

การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ
รวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

นางสาวนุศรา ไรจน์วิลาวัลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

TREATMENT OF CUTTING OIL WASTEWATER BY ELECTRO-COAGULATION AND
PHOTO ELECTRO FENTON PROCESS

Miss Nusara Rojvilavan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ
รวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

โดย

นางสาวนุสรุา โรจนวิลาวัลย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. มรุพัชร์ จำนงค์วงศ์)

นุสรุจา โจรจนวิลาวัลย์ : การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน. (TREATMENT OF CUTTING OIL WASTEWATER BY ELECTRO-COAGULATION AND PHOTO ELECTRO FENTON PROCESS)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
 ดร.อรอนงค์ ลากปิริสุทธิ, 201 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (เฟนตัน อิเล็กโทรเฟนตันและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oily-wastewater) ที่มีค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาในส่วนของกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด (พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ของแข็งละลายน้ำและปริมาณเพอร์ริสไดออกไซด์) จากผลการศึกษากการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าพบว่าสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม ระยะห่างระหว่างขั้ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาการเก็บมีค่าเท่ากับ 1 – 3 เซนติเมตร 36 - 60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 30 – 60 นาที ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด 90 % (ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด \approx 0.1 กรัมต่อลิตร) แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังไม่ผ่านมาตรฐาน จึงมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน อิเล็กโทรเฟนตันและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกลไกการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมันที่คงเหลือด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH \cdot) สำหรับตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนเพอร์ริสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล และระยะเวลาในการกักเก็บ เป็นต้นและพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานโดยมีสภาวะการทำงานเหมาะสมคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราส่วนเพอร์ริสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:5 – 1:10 โดยมวล และระยะเวลาการเก็บกัก 15 – 60 นาที นอกจากนี้ จากการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่า ประสิทธิภาพรวมสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียมีค่าประมาณ 99% และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐาน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2554.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270363921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CUTTING OIL-WASTEWATER/ELECTRO-COAGULATION / ADVANCED OXIDATION PROCESSES(AOPs) / ELECTRO FENTON / PHOTO ELECTRO FENTON

NUSARA ROJVILAVAN: TREATMENT OF CUTTING OIL WASTEWATER BY ELECTRO-COAGULATION AND PHOTO ELECTRO FENTON PROCESS .ADVISOR: ASST. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ON-ANONG LARPPARISUT, Ph.D., 201 pp.

This research aims to study the application of Electro-coagulation (EC) and Advanced oxidation process as Fenton Electro-Fenton (EF) and Photo-Electro Fenton for treating the cutting oily-wastewater. Cutting oil concentration of 1 g/l. For the EC process, the influence of different parameters such as current density, electrode distance and effluent characteristics (pH, conductivity TDS and concentration of Ferrous ion) were investigated. The study showed that the highest treatment efficiency from EC process 90% (\approx Cutting oil concentration of 0.1 g/l) of can be obtained with electrode distance, current density and operating time equal to 1 - 3 cm, 36 - 60 A/m² and 30 - 60 minutes, respectively. However, the effluent did not comply with the industrial effluent standard in term of COD. Therefore, the Fenton Electro-Fenton and Photo-Electro Fenton processes should be applied as post-treatment process in order to improve the overall treatment efficiency. The remaining oil-droplets can be oxidized by the strong oxidizing agent (Hydroxyl radical, ·OH). Moreover, the effect of current density concentration of Hydrogen peroxide (F/H ratio by mass) and retention time. The optimal operating conditions, by using the EF process, were current density 71.43 A/m², F/H ratio 1:5 – 1:10 and operating time 15 - 60 minutes. Finally, the continuous system of EC and EF as pre and post-treatment processes provided 99% overall treatment efficiency, and thus the treated effluent that passed the standard

Department : Environmental Engineering.....	Student's Signature
Field of Study : Environmental Engineering.....	Advisor's Signature
Academic Year : 2011.....	Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. อรอนงค์ ลาปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพกุล และ ดร. มรุพัชร จำนงค์วงศ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ตีพิมพ์ แก้ไขให้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ วิทยวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งาน ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการทำเรื่องเอกสารต่างๆ และให้คำแนะนำในการทำเอกสารในการติดต่อเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อเงินทุนในการศึกษางานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องสาว ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	5
2.3 สารลดแรงตึงผิว.....	8
2.4 น้ำมันตัด.....	9
2.5 ประเภทน้ำมันตัด.....	10
2.6 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	11
2.7 ไฟฟ้า.....	16
2.8 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	23
2.9 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย.....	24
2.10 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	25
2.11 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน..	29

บทที่	หน้า
2.12 ประเภทของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (AOPs).....	33
2.13 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton Reaction).....	35
2.14 กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน (Electro-Fenton Process).....	37
2.15 กระบวนการโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน (Photo Electro Fenton)	39
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
.	
3 ขั้นตอนที่ดำเนินการวิจัย.....	64
3.1 แผนการทดลอง.....	64
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	65
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	69
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	82
4.1 ศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียจากน้ำมันตัดก่อนการบำบัด.....	82
4.2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการทำลายเสถียรภาพ.....	84
4.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวม ตะกอนทางไฟฟ้า.....	90
4.4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตัน..	105
4.5 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการอิเล็ก โตรเฟนตัน.....	108
4.6 ศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการโฟโตอิเล็ก โตรเฟนตัน.....	121
4.7 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและ กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	125
4.8 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ แตกต่างกัน	133

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	136
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	145
ภาคผนวก ก.....	146
ภาคผนวก ข.....	152
ภาคผนวก ค.....	154
ภาคผนวก ง.....	169
ภาคผนวก จ.....	172
ภาคผนวก ฉ.....	183
ภาคผนวก ช.....	190
ภาคผนวก ซ.....	193
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	201

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย.....	15
2.2	ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE	19
2.3	ความสามารถในปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่างๆ.....	31
2.4	สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล.....	32
2.5	ประเภทของ AOPs.....	33
2.6	กลไกในการเกิดปฏิกิริยากระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน.....	41
2.7	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยาสูบ.....	44
2.8	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ.....	57
3.1	ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด.....	68
3.2	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์.....	70
3.3	ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	71
3.4	ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วย Coagulation – Flocculation.....	72
3.5	ตัวแปรในการศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า.....	73
3.6	ตัวแปรการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตัน.....	75
3.7	ตัวแปรการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการอิลีกโตรเฟนตัน.....	76
3.8	ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโฟโตอิลีกโตรเฟนตัน.....	78
3.9	ตัวแปรในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียโดยกระบวนการผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	80
4.1	ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการบำบัด.....	83
4.2	ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	91
4.3	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชัน.....	101
4.4	อันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาห่างระหว่างขั้วที่แตกต่างกัน.....	104

ตารางที่		หน้า
4.5	อันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	120
4.6	ค่าการออกแบบและการควบคุมระบบที่เหมาะสมด้วยกระบวนการต่างๆ โดย การเดินระบบแบบที่ละเท.....	125
4.7	ตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัด.....	133
4.8	แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ แตกต่างกัน.....	134

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงดึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ.....	7
2.2	การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงดึงผิวร่วม.....	7
2.3	โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงดึงผิว.....	8
2.4	ประเภทของสารลดแรงดึงผิวเมื่อแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำ.....	9
2.5	อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic)	13
2.6	การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	23
2.7	อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation)	25
2.8	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้า คงที่.....	26
	(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้า คงที่.....	
2.9	ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้า คงที่.....	27
	(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้า คงที่.....	
2.10	การติดตั้งถังปฏิกรณ์.....	45
2.11	แผนภาพแสดงประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีโดยการเติมสารเคมี.....	46
2.12	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ชนิดขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	49
2.13	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ ด้านบน.....	49
2.14	กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า.....	54
2.15	กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน.....	55
2.16	กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน.....	56
3.1	แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน.....	65
3.2	แผนผังการต่อชุดอุปกรณ์โฟโตอิเล็กโทรโฟโตเฟนตัน.....	65
3.3	แผนผังการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสตาติกและโฟโตอิเล็กโทรโฟโตเฟนตัน.....	66

ภาพที่	หน้า	
3.4	ลักษณะขั้วไฟฟ้า.....	66
3.5	แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์.....	71
3.6	แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ.....	72
3.7	แผนผังการหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	74
3.8	แผนผังการสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	75
3.9	แผนผังการสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน.....	77
3.10	แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน.....	78
3.11	แผนผังศึกษาการทดลองแบบผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	80
4.1	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น.....	83
4.2	ไดอะแกรมการควบคุมกลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย $FeCl_3$	86
4.3	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน.....	86
4.4	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน.....	87
4.5	กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุบนคอลลอยด์.....	88
4.6	กลไกห่อหุ้มคอลลอยด์ด้วยผลึก (sweep floc coagulation).....	88
4.7	ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ปริมาณ $FeCl_3$ ที่แตกต่างกัน.....	89
4.8	ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นที่ปริมาณ $FeCl_3$ ที่แตกต่างกัน.....	89
4.9	ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วที่มีต่อพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ.....	92
4.10	ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ระยะห่างระหว่างขั้วแตกต่างกัน.....	92
4.11	ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นที่ระยะห่างระหว่างขั้วแตกต่างกัน.....	93
4.12	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	95
4.13	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน....	95
4.14	ลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดและหลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ รวมตะกอนทางไฟฟ้า.....	96
4.15	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	97

ภาพที่	หน้า	
4.16	การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน....	98
4.17	การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.	99
4.18	ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	100
4.19	ไดอะแกรมแสดงชนิดของเหล็กที่สภาวะต่างๆ.....	102
4.20	ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า.....	102
4.21	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่อัตราส่วนเฟอร์รัสซัลเฟต/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกต่างกัน.....	107
4.22	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่อัตราส่วนเฟอร์รัสซัลเฟต/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกต่างกัน.....	107
4.23	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	110
4.24	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน	111
4.25	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่อัตราส่วนเฟอร์รัส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน	113
4.26	การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	114
4.27	การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน..	115
4.28	ปริมาณเฟอร์รัสไอออนภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	116
4.29	ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	117
4.30	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	118
4.31	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันและกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน.....	123
4.32	การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน.....	124
4.33	การติดตั้งถึงปฏิกรณ์กระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	126
4.34	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและอิเล็กโทรเฟนตันที่อัตราการไหล 66 มิลลิลิตรต่ออนาที 33 มิลลิลิตรต่ออนาที และ 16 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	127

ภาพที่	หน้า
4.35 การคำนวณหาความเข้มข้นขาออกของถังปฏิกริยาแบบต่างๆ ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 30 นาที ในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า	130
4.36 การคำนวณหาความเข้มข้นขาออกของถังปฏิกริยาแบบต่างๆ ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 30 นาที ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	130
4.37 เปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิการบำบัดกับผลการทดลองการบำบัดจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า.....	131
4.38 เปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิการบำบัดกับผลการทดลองการบำบัดจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	131

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทย มีการพัฒนาของอุตสาหกรรมอย่างมาก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง โดยปัญหาน้ำเสียเป็นปัญหาหนึ่งซึ่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอย่างรุนแรง กล่าวได้ว่าแหล่งกำเนิดน้ำเสียส่วนหนึ่งนั้นมีสาเหตุมาจากอุตสาหกรรม โดยอุตสาหกรรมโลหะเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการขยายตัวค่อนข้างสูงซึ่งมักจะมีขั้นตอนการตัดและการขึ้นรูปของโลหะ ดังนั้นน้ำมันตัดจึงมีความจำเป็นและมีปริมาณการใช้ที่เพิ่มสูงขึ้นในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของอุตสาหกรรม ซึ่งก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำมันตัดในน้ำเสียเป็นปริมาณมาก (Kobya และคณะ, 2007) โดยทั่วไป น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมีอยู่หลายรูปแบบ คือ น้ำมันที่อยู่ในรูปฟิล์มลอยอยู่บนผิวน้ำ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้ (Aurelle, 1985) แต่ประเภทที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบ เช่น น้ำมันตัด เป็นต้น ทั้งนี้ น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัดมีค่าความคงตัวสูง อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคน้ำมันตัดที่มีขนาดเล็กมากและมีน้ำมันแร่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ รวมถึงมักมีการเติมสารลดแรงตึงผิวในส่วนผสม ซึ่งทำให้บำบัดได้ยากด้วยกระบวนการบำบัดทั่วไป (Kobya และคณะ, 2007)

ด้วยองค์ความรู้เกี่ยวกับการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันในประเทศยังมีอยู่จำกัด ทำให้ไม่สามารถแก้ไขปัญหการปนเปื้อนของน้ำมันได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันสำหรับบำบัดน้ำเสียข้างต้น โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เป็นการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการผ่านสนามไฟฟ้ากับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน โดยมีข้อดีในด้านประสิทธิภาพการบำบัดและลดปริมาณสารเคมีในกระบวนการบำบัด (Bensadok และคณะ, 2007) ในขณะที่กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process, AOPs) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เพื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และการใช้รังสี UV เพื่อผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล ($OH\cdot$) ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะไปทำลายโมเลกุลของสารประกอบที่เป็นพิษ ทำให้น้ำเสียมีความสะอาดขึ้น และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

จะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยขึ้นกับค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นของสารที่ถูกออกซิไดซ์ (จันทนภาและจิตติมา, 2546)ถึงแม้ทั้ง 2 วิธีการนี้จะสามารถกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ได้ดีและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น แต่ยังคงมีข้อจำกัดในแต่ละกระบวนการในด้านคุณภาพน้ำทิ้งที่ยังอาจไม่ผ่านมาตรฐาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดมีไม่ค่อยแพร่หลายมากนักซึ่งจากงานวิจัยที่ทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า และกระบวนการเฟนตันนั้น พบว่าให้ประสิทธิภาพมากกว่า 90 % (Bensadok, 2007; ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) แต่เนื่องจากน้ำมันตัดมีปริมาณค่าความเข้มข้นสูงภายในกระบวนการผลิต ดังนั้น ถ้าเลือกใช้เพียงกระบวนการหนึ่งกระบวนการเดียว น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีคุณภาพน้ำไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง

ในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการนำทั้ง 2 กระบวนการมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยรวม โดยกระบวนการบำบัดทั้ง 2 ที่กล่าวมาเป็นกระบวนการที่อาศัยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกในการผลิตสารโคแอกกูแลนต์ (Fe^{2+}) ในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า และตัวทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้างปฏิกิริยาเฟนตันในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน และเป็นกระบวนการที่มีการติดตั้งระบบคล้ายคลึงกัน ซึ่งทำให้ง่ายต่อการดำเนินระบบ โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละกระบวนการข้างต้นได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว ค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณในการเติมสารเคมี เป็นต้น (Bensadok, 2007) ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการทำงานของแต่ละกระบวนการผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกของอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสีย (กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า) รวมถึงการผลิตไฮดรอกซิลเรดิเคิล (กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน) แนวทางการออกแบบและเดินระบบที่เหมาะสม นอกจากนี้ ยังมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมจากแต่ละกระบวนการข้างต้น เพื่อศึกษาผลจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในทางปฏิบัติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า กระบวนการเฟนตัน กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันและกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และอัตราส่วนการเติมสารเคมี เป็นต้น
- 1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางการเดินระบบและออกแบบที่เหมาะสม ทั้งในระบบแบบที่ละเท (Batch system) และระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับทดลอง ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ โดยน้ำมันที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ได้มาจาก น้ำมันตัดตราคอลลอสตรอล และทำการผสมกับน้ำประปาให้มีความเข้มข้นของน้ำมันตัด 0.1 - 1 กรัมต่อลิตร (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552)

1.3.2 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง คือ ขั้วเหล็ก โดยขั้วไฟฟ้ามีขนาด หนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 7 เซนติเมตร ยาว 17 เซนติเมตร

1.3.3 เดินระบบแบบที่ละเท เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1.3.1.1 สำหรับกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พีเอช ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำเสีย เป็นต้น

1.3.1.2 สำหรับกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พีเอช อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($Fe^{2+} : H_2O_2$) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำเสีย เป็นต้น

1.3.1.3 เดินระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลของน้ำเสีย รวมถึงเสนอแนะแนวทางการประยุกต์ใช้งาน และการออกแบบอย่างเหมาะสม

1.3.1.4 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ซีไอดี ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าของแข็งละลายน้ำ ปริมาณน้ำมันและไขมัน ความขุ่น และปริมาณเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

1.4.2 เข้าใจถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม เช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว พีเอชเริ่มต้น อัตราส่วนการเติมสารเคมีและอัตราการไหลของน้ำเสีย เป็นต้น

1.4.3 แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ รวมถึงเสนอแนะรูปแบบการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในทางปฏิบัติ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะ จะมีการตัดกลึงหรือเจาะโลหะโดยใช้ใบมีด ทำการเจาะและเฉือนเนื้อโลหะเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้ ในขณะที่ตัดกลึงโลหะจะมีการเสียดสีระหว่างใบมีดกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนสูงมาก หากไม่มีการระบายความร้อนออกโดยเร็ว ก็จะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ใบมีดและชิ้นงาน ทำให้ใบมีดขาดความแข็งแรงและเกิดการสึกหรอ ส่วนชิ้นงานที่ได้จะมีผิวที่ขาดความสม่ำเสมอ ขนาดของรูที่จะมีการบิดเบี้ยว จึงจำเป็นต้องมีการใช้น้ำมันตัด ในการตัดกลึงโลหะ เพื่อระบายความร้อน ลดแรงเสียดทานและช่วยในการนำเศษชิ้นโลหะออกมาจากชิ้นงาน

น้ำมันตัดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำมันแร่ สารป้องกันการกัดกร่อน สารต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบส สารป้องกันการเกิดแบคทีเรีย ดังนั้น การทิ้งน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oily-wastewater) โดยไม่ผ่านการบำบัด อาจจะทำให้เกิดปัญหามลพิษอย่างรุนแรง

2.2 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ (มันรัศและมันลิน, 2545)

2.2.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ (Aurelle, 1985) น้ำมันสามารถละลายน้ำได้เล็กน้อยซึ่งจะต้องพิจารณาจาก

- ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลงและเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าโพลาไรตีที่สูงขึ้น
- ความสามารถในการระเหย (Volatility)
- ความสามารถของน้ำมันชนิดเบาจะดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก ทั้งเรื่องความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการระเหย

จากลักษณะของน้ำมันดังที่กล่าวมาแล้ว หากน้ำมันสามารถละลายน้ำได้การตรวจสอบจะทำได้ยาก นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดผลกระทบเรื่องกลิ่นและรสของน้ำที่เปลี่ยนไป ดังนั้นถือได้ว่าน้ำมันที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นสารมลพิษที่อันตรายรูปแบบหนึ่ง

2.2.2 น้ำมันที่เป็นอิมัลชันไม่มีสารลดแรงตึงผิว

เป็นรูปแบบของอิมัลชันที่ไม่คงตัว (Non-stabilized emulsion) โดยที่อนุภาคอิมัลชันสามารถรวมตัวกันได้เองเมื่อสัมผัสกันและมีแนวโน้มที่จะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน

- ถ้าอนุภาคลอยและกระจายอยู่ในน้ำนานถือว่าอิมัลชันมีความคงตัวมาก
- ถ้าขนาดอนุภาคเล็กเวลาในการลอยขึ้นและรวมตัวกับอนุภาคอื่นจะมาก

ดังนั้นขนาดอนุภาคจึงขึ้นอยู่กับลักษณะการกวนผสม เช่น พลังงานที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน

$$W_A = A_{O/W} \times \gamma_{O/W} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$W_A = \text{พลังงานกลที่ใช้ (ergs/cm}^3\text{)}$$

$$A_{O/W} = \text{พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำ (cm}^2\text{/cm}^3\text{)}$$

$$\gamma_{O/W} = \text{แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ergs/cm}^2\text{ หรือ dyne/cm)}$$

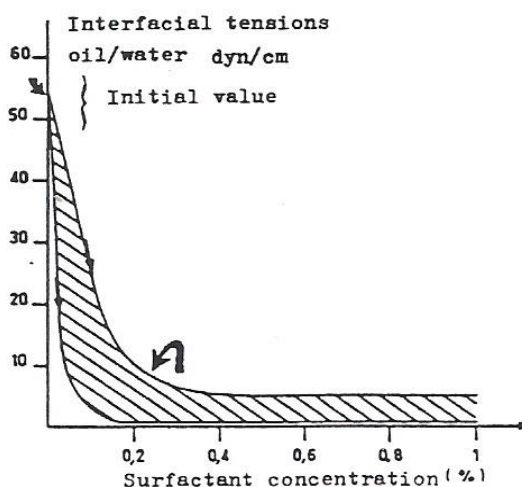
ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำจึงมีค่าเท่ากับ

$$A_{O/W} = \frac{W_A}{\gamma_{O/W}} \quad (2.2)$$

แต่จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกวนหยดน้ำมันเหล่านี้จะรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม

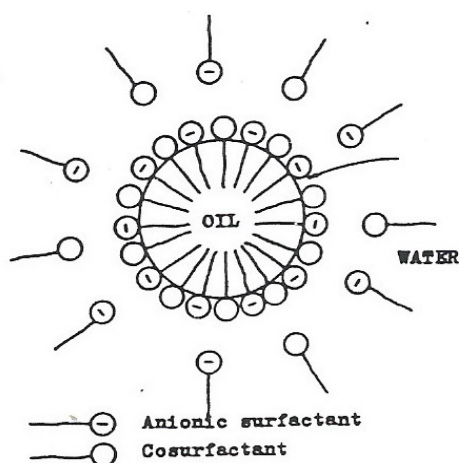
2.2.3 น้ำมันที่เป็นอิมัลชันมีสารลดแรงตึงผิว

เป็นรูปแบบของอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันทั่วไปทั้งจากชุมชนและอุตสาหกรรม โดยสารลดแรงตึงผิวจะแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมัน เท่ากับการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน หรือลดแรงตึงระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมันลง (ดังภาพที่ 2.1) ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เป็นสารกระจายมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ (Aurelle, 1985)

นอกจากนี้ ถ้านำเสียปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ผลที่เกิดขึ้นคือ จะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักดันระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวลง (ดังรูปที่ 2.2) ดังนั้นถ้าอิมัลชันมีสารลดแรงตึงผิวร่วมปนอยู่อนุภาคน้ำมันจะมีขนาดเล็กมาก (100-600 อังสตรอม)



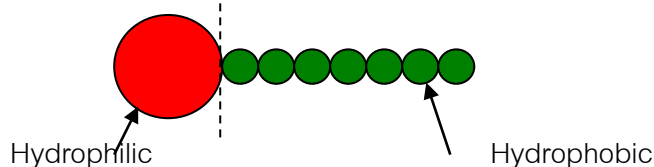
ภาพที่ 2.2 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

2.2.4 फिल्मหรือชั้นน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงลอยอยู่บนผิวน้ำ ในลักษณะของฟิล์มบางๆ และปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้างแม้มีปริมาณน้ำมันน้อย เนื่องจากฟิล์มเหล่านี้มักมีเรียงตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monolayer) จะแพร่กระจายขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง โดยน้ำเสียลักษณะนี้สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าคือสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งอยู่ที่ผิวน้ำ

2.3 สารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Hydrophilic (ส่วนที่ชอบน้ำ) เป็นส่วนหัวของโมเลกุล และ Hydrophobic (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) เป็นส่วนหางของโมเลกุล (ดังภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

สามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนชอบน้ำออกเป็น 4 ประเภท (ดังภาพที่ 2.4) ได้แก่

2.3.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุลบ นิยมใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ในอุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน เป็นต้น ถูกใช้มากถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี โดยส่วนมากอยู่ในรูปของ carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate เป็นต้น

2.3.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุบวก ส่วนมากจะเป็นพวก Quaternary ammonium ที่ไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เป็นด่างสูง (พีเอช 10 - 11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวกทำให้เกิดเป็นตะกอน ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิว

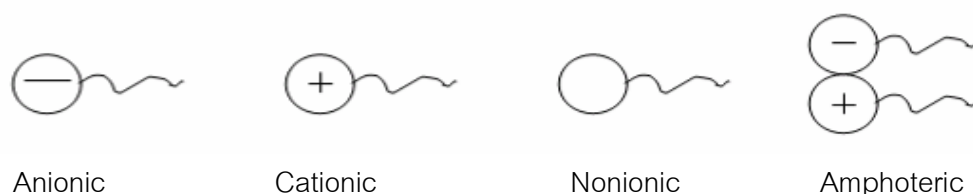
ประเภทส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุบวกจะก่อให้เกิดการระคายเคืองน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ ดังนั้นจึงใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำยาปรับผ้านุ่ม และครีมนวดผม เป็นต้น

2.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำไม่มีประจุ แต่สามารถพบพวกที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุได้ เช่น polyether หรือ polyhydroxyl ซึ่งใช้มากในกลุ่มของผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

2.3.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชสภาวะแวดล้อม ถ้าเป็นด่าง (พีเอช > 7) ประจุไฟฟ้าจะเป็นประจุลบ แต่ถ้าเป็นกรด (พีเอช < 7) ประจุไฟฟ้าจะเป็นประจุบวก ส่วนสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดประจุไฟฟ้า สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม แต่ในปัจจุบันมีการนำไปใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่นๆ



ภาพที่ 2.4 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวเมื่อแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำ

2.4 น้ำมันตัด (Cutting oil)

น้ำมันตัดเป็นน้ำมันที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมโลหะ ในการตัดกลึง เชื้อเพลิงและเจาะโลหะ หน้าหลักของน้ำมันตัดในการตัดกลึงโลหะแบ่งออกเป็น 4 ประการ คือ

2.4.1 ระบายความร้อนที่คมตัด และ ชี้นงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดทานของการขึ้นรูป หรือ การตัดเฉือน

2.4.2 การหล่อลื่นระหว่างมีดตัด (Cutting tool) กับชิ้นงาน เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการเสียดสีของโลหะ

2.4.3 ชะล้างและพาเศษโลหะที่เกิดจากการตัดเฉือนออกไปจากบริเวณตัดเฉือนและชิ้นงาน

2.4.4 ป้องกันสนิม น้ำมันตัดกลึงโลหะทำหน้าที่ป้องกันสนิมให้แก่ชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนใหม่ ซึ่งผิวโลหะส่วนนี้มักไวต่อการเกิดสนิม

2.5 ประเภทน้ำมันตัด (ออยเชิร์ฟ, 2554 : ออนไลน์)

น้ำมันตัด จะมีอัตราส่วนผสม แตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของน้ำมันตัดหรือตามความต้องการใช้งาน โดยปกติจะผสมใช้งานอยู่ในช่วง 2% ถึง 10% ในน้ำ ซึ่งนิยมแบ่งน้ำมันตัดออกเป็น 4 ประเภทตาม % สัดส่วนผสมของน้ำมันตัดพื้นฐาน คือ Straight Oil (น้ำมันแร่ 100 %)

น้ำมันชนิดนี้เป็นน้ำมันแร่ หรือน้ำมันปิโตรเลียม 100% ไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ อาจมีสารเพิ่มคุณภาพ (additive) หรือไม่มีก็ได้ ส่วนงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษโดยเฉพาะก็ต้องเติมสารคุณภาพเข้าไป คุณลักษณะที่เด่นของน้ำมันชนิดนี้ คือ การหล่อลื่นและการลดแรงกระแทกระหว่างชิ้นงานและมีติด แต่ในทางกลับกันน้ำมันชนิดนี้ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดี จึงนิยมใช้ในงานตัดที่มีความเร็วตัดต่ำๆ

2.5.1 Soluble Oils

Soluble oils เป็นน้ำมันแร่ที่ผสมสารอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ทำให้มีคุณสมบัติในการรวมตัวกับน้ำได้ดี และเกาะติดชิ้นงานได้ดีระหว่างที่ทำการขึ้นรูป Soluble oils มีคุณสมบัติการระบายความร้อนดีเนื่องจากมีน้ำเป็นส่วนผสม soluble oils จะมีส่วนผสมของสารเพิ่มคุณภาพในการป้องกันสนิม ป้องกันการเสื่อมสภาพจากแบคทีเรีย ดังนั้นต้นทุนในการบำรุงรักษาน้ำมันเพื่อให้คงสภาพไว้จึงค่อนข้างสูง

2.5.2 Synthetics

Synthetic เป็นสารสังเคราะห์ที่ใช้ในการตัดกลึงชนิดหนึ่ง ของเหลวนี้มีความเสถียรสูง และเข้ากับน้ำได้ดี และใช้น้ำในการทำให้เจือจาง โดยมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดีให้การหล่อลื่นได้ดี ป้องกันการเกิดสนิม และบำรุงรักษาง่าย ข้อเสียคืออาจเป็นอันตรายต่อผิวหนัง

2.5.3 Semi-synthetics

Semi-synthetics เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ Semi-synthetics จะมีลักษณะโปร่งแสง มีความขุ่นเพียงเล็กน้อยและไวในการตอบสนองต่อความร้อน โดย Semi-synthetics จะต่างจากน้ำมันชนิดอื่น คือ เมื่อน้ำมันหล่อเย็นที่ใช้มีความร้อนสูง โมเลกุลของน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ มีแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากน้ำมันมาเกาะกับมีดตัด (Cutting tools) ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดีมากขึ้น และเมื่อส่วนผสมเย็นลงน้ำมันก็จะแตกตัวอีก

2.6 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

2.6.1 กระบวนการแยกทางชีวภาพ (Biological processes)

เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่น้ำมันจะถูกย่อยสลายทางชีวภาพ แต่จะต้องผ่านการบำบัดน้ำขั้นต้น ก่อนเข้าสู่กระบวนการชีวภาพ เช่น ระบบ Activated sludge, Tricking filter เป็นต้น (สุดสิริ ลีตสุภวัฒน์, 2552)

2.6.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical method)

เป็นการเติมสารเคมีเข้าไปในกระบวนการ เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน หรือเพื่อทำลายโครงสร้างจนสามารถแยกน้ำมันออกได้ นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เช่น การใช้สารลดแรงตึงผิวหรือการเติมสารดีมัลซิฟายเออร์ ทั้งนี้จะเกิดการทำลายสภาพอิมัลชัน (Demulsification) ประกอบด้วยการกวนเร็ว (Rapid mixing) เมื่อเติมสารเคมีเพื่อลดประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสในการชน (Flocculation) และอนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน (Floatation) แต่วิธีนี้ยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด (สุดสิริ ลีตสุภวัฒน์, 2552)

2.6.3 กระบวนการทางกายภาพเคมี (Physico-chemical method)

เป็นการแยกอนุภาคน้ำมันออกโดยใช้กระบวนการที่ประยุกต์ใช้กลไกทางกายภาพร่วมกับทางเคมี เช่น การตกตะกอน การทำให้ลอยตัว การให้ความร้อน การปั่นกวน การกรองเบื้องต้น การกรองอนุภาคขนาดเล็กและการผ่านเมมเบรน เป็นต้น (Ichikawa และคณะ, 2004)

2.6.3.1 การดูดซับ (Adsorption) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงและต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอนเมื่อเกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full-scale เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activate carbon) เป็นการเปลี่ยนน้ำมันที่ปนเปื้อนในรูปของเหลว ให้ถูกดูดซับอยู่บนผิวของแข็ง

2.6.3.2 การใช้อุปกรณ์โคalesceเซอร์ (Coalescer) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย ดังนั้นน้ำที่เข้าระบบจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน โดยจะเพิ่มโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กขณะที่ผ่านตัวกลาง เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.6.3.3 การกรอง (Filtration) สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย รวมทั้งกำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ แต่ต้องทำการล้างย้อน (Backwash) หากมีการอุดตัน จะต้องบำบัดน้ำล้างย้อนด้วย ตัวกลางที่ใช้ในการกรอง เช่น Sand, anthracite เป็นต้น

2.6.3.4 การทำให้ลอย (Flotation) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากสำหรับการกำจัดน้ำมันและไขมัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ หลักการของกระบวนการนี้ คือ ทำให้น้ำมันหรือไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยขึ้นโดยอาศัยแรงลอยตัวของฟองอากาศพุงน้ำมันหรือไขมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ มีข้อดี คือ สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชัน นอกจากนี้สามารถรับ Shock load ได้มาก ตัวอย่าง เช่น

- Dissolved Air Flotation (DAF) ใช้หลักการเป่าอากาศลงในน้ำเสียภายใต้ความดันสูงจนกระทั่งอากาศละลายน้ำเกินจุดอิ่มตัว จากนั้นปล่อยให้เข้าสู่สภาวะความดันบรรยากาศ อากาศส่วนเกินก็จะหนีออกจากรูน้ำเป็นฟองเล็กๆ พาดะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำ

- Induced Air Flotation (IAF) การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถนำพาดะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ แต่ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งและไขมันต่ำกว่าระบบ Dissolved Air Flotation

- Vacuum Flotation การเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว มี 2 วิธี คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรงหรือปล่อยให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเองระบบนี้จะใช้ถังปิดสุญญากาศซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ควบคุมการเปิดปิดด้วยวาล์ว อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ พาดะกอนต่างๆ ในน้ำเสียลอยขึ้นสู่ผิวน้ำในลักษณะของสกัม (Scum) แต่วิธีการซับซ้อนทำให้ไม่เป็นที่นิยม

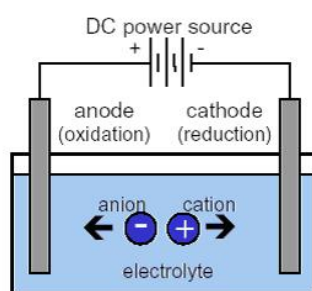
2.6.3.5 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes) ใช้กำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำ ในกรณีนี้เกิดการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด จึงต้องมีการบำบัดขั้นต้น ดังนั้นไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full-scale เช่น Reverse Osmosis, Ultrafiltration เป็นต้น

2.6.3.6 การใช้ความร้อน (Thermal process) เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน ซึ่งถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจะลดลงทำให้น้ำมันสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวได้ง่าย ซึ่งดีต่อการกำจัดน้ำมันออกจากรน้ำ

2.6.4 การแยกไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry/Electrostatic processes) (สุดสิริ ลีจิตสุภาวัฒน์, 2552)

การเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพ และการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Floatation) ด้วยไฟฟ้า โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับปริมาณและขนาดของขั้วไฟฟ้า แต่จะขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้ คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูงและระบบบำบัดมีขนาดเล็ก โดยกระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการแยกระหว่างน้ำกับน้ำมันมีอยู่ 4 วิธี คือ

2.6.4.1 อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic) กระบวนการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำ โดยใส่สนามไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำและใช้กระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งจะทำให้ไอออนของสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า (ดังภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic)

2.6.4.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO) (Israilides, 1997) กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์

ของ OH^{\cdot} (Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุพันธ์ของ OH^{\cdot} (Hydroxyl radicals) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.6.4.3 อิเล็กโทรโฟลเทชัน (Electrofloatation) การลอยตัวด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงที่ใช้สำหรับแยกอิมัลชันประเภทน้ำมันกับน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยขั้วไฟฟ้าแอโนดจะเกิดเป็นฟองก๊าซออกซิเจนขนาดเล็ก (ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาก) และกระจายตัวออกอย่างรวดเร็วเพื่อช่วยในการลอยตัวขึ้นของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ขั้วไฟฟ้างดงกล่าวเกิดการสึกกร่อนได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนขั้วใหม่เสมอ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซเพียงอย่างเดียว ไม่เกี่ยวกับเวลาในการทำปฏิกิริยา

2.6.4.4 กระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation) กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย ใช้ต้นทุนในการติดตั้งและดำเนินการต่ำกว่าระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป อีกทั้งประหยัดเวลาในการบำบัด โดยการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดตัวตะกอนตามธรรมชาติจากการละลายขั้วอะลูมิเนียมหรือเหล็กด้วยไฟฟ้า เกิดตัวตะกอนคืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หรือเหล็กไฮดรอกไซด์ที่ขั้วแอโนดซึ่งเป็นตัวตะกอนที่มีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย

(Arizona Department of Environmental Quality, 1996)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Air Flotation	DAF, IAF	-สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้	-ต้องกำจัดตะกอนทางเคมี
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	-ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้	-ต้องกำจัดตะกอนทางเคมี
Coalescence	Fibrous membrane	-กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ	-ต้องมีการบำบัดขั้นต้น -อุดตันง่าย -ไม่เหมาะสมกับ full-scale
Membrane processes	Reverse osmosis, ultrafiltration,	-สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้	-อุดตันง่ายอายุการใช้งานจำกัดไม่เหมาะสมกับ full-scale -ต้องบำบัดขั้นต้น
Biological processes	Activated sludge	-สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ	-ต้องบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
Carbon adsorption	GAC และ PAC	-กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ	-ต้องบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร. -ค่าใช้จ่ายสูง -ต้องฟื้นฟู/เปลี่ยนคาร์บอน -ไม่เหมาะสมกับ full-scale

จากตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย เราสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า แต่ละกระบวนการข้างต้นจะมีข้อดี ข้อเสีย รวมถึงข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไปในทางปฏิบัติ โดยที่กระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry /

Electrostatic processes) นั้น นับว่าเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและไม่ยุ่งยากต่อการติดตั้งและดูแลรักษาระบบ โดยกระบวนการนี้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองแล้ว จะเกิดกระแสอิเล็กตรอนขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน โดยสามารถทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นสู่น้ำได้ ใช้ระยะเวลาดำเนินการสั้น จึงถือว่าเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการนำมาใช้เพื่อแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำ และเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (Recycle) ต่อไป ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดซึ่งมีความคงตัวสูง (อนุภาคน้ำมันขนาดเล็ก) และบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดโดยทั่วไปได้ยากด้วยกระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี

2.7 ไฟฟ้า

2.7.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า (อภิชาติ สุทธธรรมา, 2549)

2.7.1.1 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า วัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) โดยที่จำนวนกระแสที่ผ่านไปในหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current intensity, J) การวัดของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (conductivity) โดยที่โลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_0) ได้ดังสมการ (2.4)

2.7.1.2 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า วัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density, J) คือ กระแสไฟฟ้า (I) ที่ผ่านไปในหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด (A) ดังแสดงในสมการ 2.4

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.3)$$

เมื่อกระแสผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) โดยที่โลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม พบว่า เมื่อความต่างศักย์คงที่ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าคงที่ กระแสจะคงที่ด้วย โดยความหนาแน่นของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า ได้คือ

$$J = \sigma \cdot E_0 \quad (2.4)$$

พิจารณาตัวนำยาว l [ก] มีความต่างศักย์ V ดังนั้น

$$J = \sigma \cdot \frac{V}{l} \quad (2.5)$$

$$\frac{I}{A} = \sigma \cdot \frac{V}{l} \quad (2.6)$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I \quad (2.7)$$

ความต่างศักย์กับกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรง ด้วยค่าคงที่ $\left(\frac{l}{\sigma A} \right)$ ซึ่ง $\left(\frac{l}{\sigma A} \right)$ เรียกว่าความต้านทาน (resistance, R) ดังนั้น

$$R = \frac{l}{\sigma A} = \frac{V}{I} \quad (2.8)$$

ส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้า σ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า ρ ซึ่ง $\rho = 1/\sigma$ ดังนั้น

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.9)$$

โดยที่ J : ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density), แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

I : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน, แอมแปร์ (A) หรือ คูลอมบ์ต่อวินาที

A : พื้นที่, ตารางเซนติเมตร

E_0 : ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า, โวลต์/เซนติเมตร

σ : ค่าความนำไฟฟ้า (conductivity), โอห์ม/เซนติเมตร

ρ : สภาพความต้านทานไฟฟ้า, เซนติเมตร/โอห์ม

V : ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุด, โวลต์

R : ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด, โอห์ม (Ω)

l □ : ความยาวของตัวนำไฟฟ้า, เซนติเมตร

2.7.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า (σ) มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า หน่วยเป็นโอห์มต่อเซนติเมตร ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะชะอะลูมิเนียมออกมาจากขั้วไฟฟ้า 9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีอะลูมิเนียมหรือเหล็กหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น

2.7.1.4 ความต้านทานไฟฟ้า (R) เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ถ้ามีความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าจะไหลมาก (โลหะจะนำไฟฟ้าได้ดีที่สุดเมื่อความต้านทานเป็นศูนย์) และเป็นส่วนกลับกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) นอกจากนี้ค่าการ

นำไฟฟ้ายังสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จะมีค่าเท่ากับ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

$$R = \frac{D}{C \times A} \quad (2.10)$$

โดยที่	R	ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)
	D	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)
	C	ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)
	A	พื้นที่หน้าตัดที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ (ตารางเซนติเมตร)

2.7.1.5 กระแสไฟฟ้า (I) เป็นปริมาณของประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขวางของตัวนำใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทิศทางของกระแสจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของประจุบวก ซึ่งจะไหลจากศักย์ที่สูงกว่าไปยังศักย์ที่ต่ำกว่า เมื่อประจุไฟฟ้าได้รับพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้า จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้า ผ่านขดลวดความต้านทานไปยังขั้วลบของเซลล์ ทั้งนี้กระแสอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไหลต่อเนื่องบนตัวนำไฟฟ้าที่เป็นของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ซึ่งจะไหลจากศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าไปยังศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า

2.7.1.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูลในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์จะหมายความว่า จุดสองจุดมีความต่างศักย์ 1 โวลต์ ฉะนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูล/คูลอมป์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์ด้วยเทอมแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force (E), emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าพบว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์} \quad (2.11)$$

เนื่องจากงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้ามาจากการถ่ายอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมป์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมป์ สมมติว่าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายอิเล็กตรอน n โมลจะมีปริมาณประจุเท่ากับ n x 96,487 หรือ nF คูลอมป์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมป์/โมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการ (2.11) จะเปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} W_{\text{elec.}} &= (nF) (E) & (2.12) \\ &= nE \times 96,487 \end{aligned}$$

ในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ (Reversible) การลดพลังงานอิสระ (- ΔG) จะเท่ากับงานที่กระทำ ดังนั้น

$$\Delta G = -nFE \quad (2.13)$$

เครื่องหมายของ ΔG มีความหมายสำคัญมาก คือ ถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นไม่ได้เอง ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้สามารถระบุได้ว่าปฏิกิริยาในเซลล์เป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เองหรืออยู่ในภาวะสมดุล (ดังตาราง 2.2)

ตารางที่ 2.2 ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE (กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ ΔG	เครื่องหมายของ ΔE
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดเองไม่ได้	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

2.7.1.7 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ F (Faraday)} &= eN & (2.14) \\ &= (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96,487 \text{ C mol}^{-1} \text{ (C = coulomb)} \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } Q \text{ (coulomb)} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)}$$

1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้า ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = \frac{l \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (2.15)$$

โดยที่	W	ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)	l	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
	M	น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด	Z	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	t	เวลาที่ใช้	F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี หมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ เป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆ เนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2.16)$$

2.7.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) (อภิวดี สุทธธรรมา, 2549)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ขั้วที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active Electrodes) ขั้วที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Inert Electrodes) และขั้วแก๊ส (Gas Electrodes) โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก ไททาเนียม แพลทินัม และแกรไฟต์ เป็นต้น

2.7.2.1 อะลูมิเนียม (Aluminium) มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน เนื้อเป็นมันเงาไม่หมองมีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนได้ง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น และแข็งมากไม่ค่อยมีรอยแตกร้าวสามารถทำให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา โดยอะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับอโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ เมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิด ไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส เกิดอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และไฮไลต์ของอะลูมิเนียม ละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าใน

อิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

2.7.2.2 เหล็กกล้า (Steels) เป็นโลหะหนัก ที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมีความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรงถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่าสนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับอโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe^{2+} ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไอออน $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$ สารละลาย Fe^{2+} นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็น Fe^{3+} ได้ Fe^{3+} อยู่ในสารละลายของน้ำเป็น hydrated ion เนื่องจาก Fe^{3+} มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป Fe^{2+} ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น $Fe(OH)_2$ ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่าพีเอช ของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่งโดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูกลงไปกว่านั้นมันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม

2.7.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญ คือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้าฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิมให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาวาว

2.7.2.4 ไทเทเนียม (Titanium) โลหะทรานซิชันลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงแข็งและเหนียว สามารถดึงเป็นเส้นได้ มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก สามารถทนก๊าซคลอรีนแห้งได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับอโลหะได้สารประกอบ

โควาเลนต์ เช่น TiO_2 , TiCl_4 เป็นต้น สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3 และ +4 ซึ่งจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็น ขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็น ตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมรับ แต่ ข้อเสียคือ ไทเทเนียมมีราคาสูง หาซื้อได้ยาก

2.7.2.5 แพลตินัม (Platinum) ธาตุสีขาว มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของ แพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวก นี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากนี้จะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ แล้ว ยังปรากฏ รวมอยู่กับพวกธาตุทองแดงเงิน และทองคำอีกด้วย มีข้อเสียคือ หาซื้อได้ยากมีน้อยมาก จึงมีราคา แพงมาก แต่มีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ ในการทำอิเล็กโทรด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทาน การกัดกร่อนสูงได้

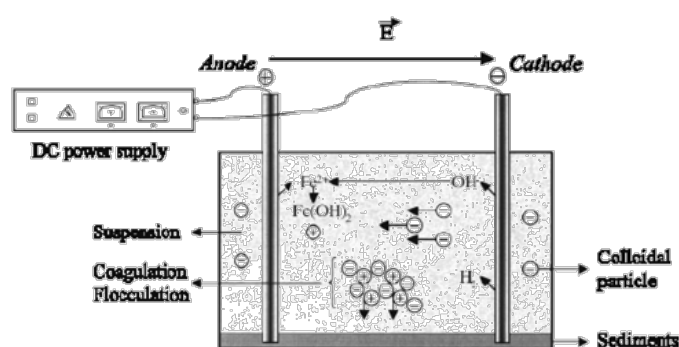
2.7.2.6 แกรไฟต์ (Graphite) อัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน มีชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร้ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็งเป็นผลึกแผ่นบางๆ ทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้มากใน ทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้ น้อย อะตอมของแกรไฟต์จะจัดตัวเป็นระนาบเป็นชั้นๆ อะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นจะอยู่ที่มุม ของรูป regular hexagon การยึดกันระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์บอนด์ แต่ ปิดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะได้ แกรไฟต์มัก ใช้ทำได้นินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ใต้ถันไฟฉาย ใต้ไฟอาร์ก รวมทั้งยังช่วย ควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

2.8 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541)

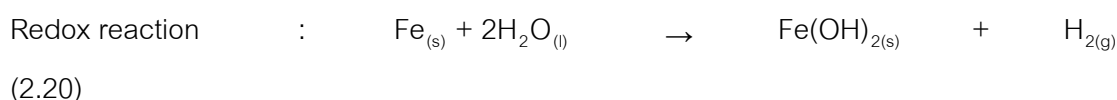
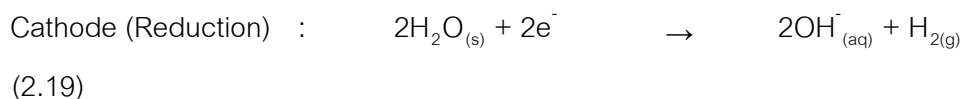
2.8.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรลิติกเซลล์ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ดังภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Larue และ Vorobiev, 2003)

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ในขณะที่ขั้วลบ (แคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และไฮดรอกไซด์ (OH⁻) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างเนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำ และทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน (Fe²⁺) และเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ Fe(OH)₂ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ Fe(OH)₃ ซึ่งสารเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำจะลอยสู่มิวน้ำโดยการลอยตัวและบางส่วนจมลง ดังสมการ (2.17) – (2.20)



2.8.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

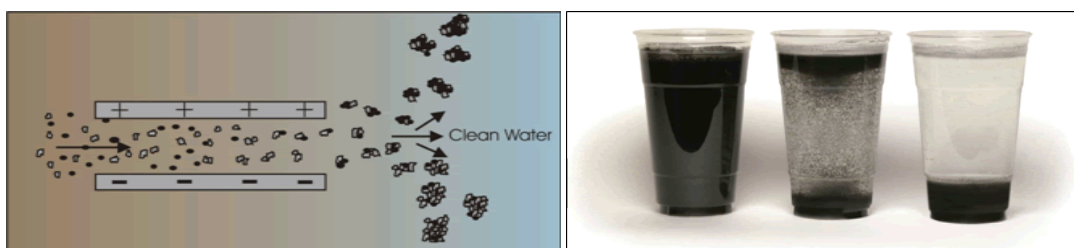
เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด (ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรงจึงต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์) เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ เป็นต้น โดยนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดมาตรฐานและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E^0_{cell}) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการนำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า ค่า E^0 ของระบบ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E^0 ของ $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานหรือที่สภาวะใดๆ คำนวณได้จากสมการ (2.21)

$$E^0_{\text{cell}} = E^0 (\text{ขั้วบวก}) - E^0 (\text{ขั้วลบ}) \quad (2.21)$$

2.9 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย

2.9.1 กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-Coagulation)

กระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าจะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน และกำจัดอนุภาคสิ่งสกปรกในน้ำ โดยจะเกิดฟล็อกของโลหะไฮดรอกไซด์เกาะจับอนุภาคของสิ่งสกปรกตกตะกอนลงมา ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซีคอมเพล็กซ์ของเหล็กในเวลาเดียวกัน (ดังภาพที่ 2.7)



ภาพที่ 2.7 อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation)

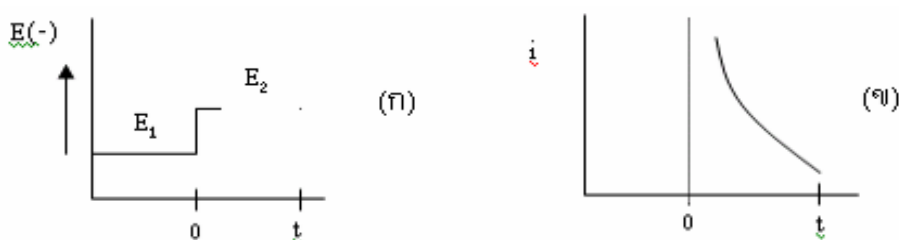
โดยอนุภาคน้ำมันตัดขนาดเล็ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย นั้น กล่าวได้ว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-3} มม. เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้ อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจําตัว โดยกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจำพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีประจุลบ เช่น หยดนํ้ามัน เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดเป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคมีเสถียรภาพสูง ทั้งนี้ ลักษณะดังกล่าวเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันบนหยดนํ้ามัน สามารถอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหยดนํ้ามันโดยใช้ทฤษฎี Electric Double Layer Theory โดยอิออนประจุลบบนหยดนํ้ามันสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้อิออนประจุบวกมาแอ็ดอยู่ที่ใกล้ผิวหยดนํ้ามัน ความหนาแน่นของอิออนประจุบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่ติดกับหยดนํ้ามันและลดลงตามระยะห่างจากหยดนํ้ามัน ทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของหยดนํ้ามันมีค่าสูงสุดที่ผิวและลดน้อยลงเมื่อห่างออกไป ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพของหยदनํ้ามันจะต้องทำให้แรงดึงดูด (Van der Waals Force) ของหยदनํ้ามันมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างหยदनํ้ามันซึ่งเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของหยदनํ้ามัน (Zeta Potential)

2.10 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

2.10.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method)

เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ อิออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไป

ไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ดังภาพที่ 2.8) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด โดย E_1 คือค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในภาพ (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)



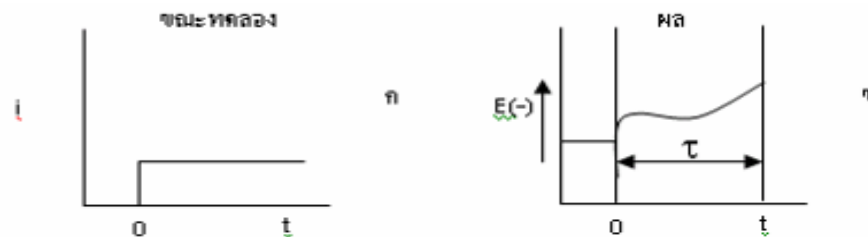
ภาพที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(Friedrich H., 1962)

2.10.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่





ภาพที่ 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (Friedrich H., 1962)

ดังนั้น ค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดอกซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) (ดังภาพที่ 2.9) ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนินสต์ (Nerns's equation)

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[red]} \quad (2.23)$$

เมื่อ	E	ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใด ๆ (โวลต์)
	E^0	ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)
	R	ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
	T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
	n	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุต่อโมล)
	F	ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ)

[Ox],[red] ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดอกซ์ตามลำดับ(โมลต่อลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรีดักชันของอ็อกซิเจนควรเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำกลับโลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$\frac{-V_{dc}}{dt} = \frac{I_L}{nF} = K_m A_e \quad (2.24)$$

เมื่อ	V	ปริมาตรของสารละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	C	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ (โมล/ลิตร)
	t	เวลา (วินาที)
	I_L	กระแสจำกัด (limiting current) (แอมแปร์)
	k_m	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer coefficient)
	A_e	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (ตารางเมตร)

อินทิเกรตสมการข้างต้นเทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp \frac{(-k_m A_e t)}{v} \quad (2.25)$$

เมื่อ	$C_{(0)}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
	$C_{(t)}$	ความเข้มข้นไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยน (โมล/ลิตร)

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญคือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า และการถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าการกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร

2.10.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

- แรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
- การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของไอออนขึ้นอยู่กับขนาดและประจุบนไอออน
- อุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
- พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเทและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
- ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า จำนวนกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ถ้ามีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น
- จำนวนประจุของไอออน เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น จำนวนประจุของไอออนจะเพิ่มมากขึ้น
- ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายนำไฟฟ้า มีสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้านั้นๆ

2.11 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน

2.11.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี (Chemical oxidation processes)

(มารุต ไปราถมานนท์, 2547)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารเคมีเป็นสำคัญในการออกซิไดซ์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสียโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี สามารถใช้งานได้หลายจุดประสงค์ดังนี้ 1) การกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ที่มีความเข้มข้นต่ำในน้ำบาดาล 2) การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง แต่มีปริมาณน้อย เพื่อลดความเป็นพิษ 3) การบำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายได้ยาก ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ให้สามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น เพื่อส่งไปเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพต่อไปได้ และ 4) เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพราะหากใช้กระบวนการบำบัดด้วยชีวภาพอย่างเดียว

อาจทำให้ใช้เวลานานในการลดสารอินทรีย์ให้ได้ตามข้อกำหนด ทั้งนี้ ตัวออกซิแดนท์โดยปกติแล้ว จะใช้โดยการเติมลงในน้ำเสียเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ ตัวออกซิแดนท์ที่ใช้ในปัจจุบันดังนี้

- คลอรีน (Chlorine) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เนื่องจาก คลอรีนจะไปทำลายจุลชีพ คลอรีนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง มีราคาถูก และสามารถ ป้อนคลอรีนลงไปในระบบได้ง่าย นอกจากนี้คลอรีนยังเป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย

- โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เป็นออกซิแดนท์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำสำหรับทศวรรษที่ผ่านมา โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สามารถเติมลงไปในระบบได้ในรูปที่เป็นของแข็งหรือในรูปของสารละลายที่เตรียมไว้ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูง แต่มีราคาแพง สามารถทำงานในช่วงพีเอช ที่กว้าง ข้อเสียของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอีกอย่างหนึ่งคือ จะเกิดการ ตกตะกอนของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ตลอดกระบวนการการออกซิไดซ์ ซึ่งจะตกตะกอนและต้อง ถูกนำไปกำจัดหลังจากนั้น โดยการทำให้ใส (Clarifying) หรือการกรอง (Filtration) ซึ่งจะก่อให้เกิด ต้นทุนที่สูงขึ้น

- ออกซิเจน (Oxygen) การทำปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์กับออกซิเจน โดยปกติแล้วจะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันปกติ มักทำปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิและความ สูง เพื่อเพิ่มลักษณะของการออกซิไดซ์ของออกซิเจนในปฏิกิริยากลาง ออกซิเจนเป็นตัวออกซิ เดนต์ที่มีความแรงปานกลางต้องการการลงทุนสูงในการติดตั้ง อย่างไรก็ตาม มีค่าการ ดำเนินงานที่ต่ำทำให้กระบวนการเป็นที่น่าสนใจ

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เป็นออกซิแดนท์ที่มีประโยชน์ สำหรับระบบอย่างมาก สามารถใช้โดยตรงหรือใช้กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมาก จะใช้ร่วมกับ เฟอร์รัส (Fe^{2+}) ที่เรียกกันว่า กระบวนการเฟนตัน หรือเกลือของเหล็กอื่น ๆ ก็สามารถ ใช้ได้

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ข้อดีโดยทั่วไป คือ 1) เป็นตัวออกซิแดนท์ตัวหนึ่งที่ใช้ กันทั่วไปในน้ำเสียที่เหลือค้างอยู่ 2) มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง 3) จัดเก็บได้ง่าย 4) มีความสามารถในการละลายน้ำ และ 5) ไม่ผลิตส่วนที่เป็นพิษหรือสี ในผลพลอยได้ นอกจากนี้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถใช้ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะผลิต ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) และกลายเป็นที่มาของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน

- โอโซน (Ozone) ในระยะแรกมีการนำโอโซนไปใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและ ไวรัสโดยประสิทธิภาพในการทำลายมากกว่าคลอรีนถึง 600-3,000 เท่า นอกจากนี้โอโซนยังไม่มี

ผลกับค่าพีเอชต่อมาจึงได้มีการปรับใช้กับน้ำเสีย เช่น การขจัดสี ปัจจุบันการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียยังมีไม่มากนักเนื่องจากมีราคาแพง

2.11.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs)

Glaze และคณะ (1997) นิยามกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันว่าเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันปกติที่ใช้ในการบำบัดน้ำ กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันนี้มีการใช้ตัวออกซิแดนท์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือโอโซน (O_3) ซึ่งจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่มีก็ได้ หรือ ใช้ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น ไฮดรอกซิลเรดิเคิล ($OH\cdot$) ซึ่งจะทำลายสารประกอบอินทรีย์ ปัจจุบันรู้จักกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันว่าเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิเคิล($OH\cdot$) จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าไฮดรอกซิลเรดิเคิล ($OH\cdot$) เป็นตัวออกซิแดนท์ที่มีความสามารถในการออกซิเดชันมากกว่าสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการเคมีทั่วไป (ปาริฉัตร มาลีวงษ์, 2547)

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่างๆ (Rodriguez, 2003)

สารเคมีในปฏิกิริยาออกซิเดชัน	ความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (โวลต์)
Fluorine	3.03
Hydroxyl radical	2.80
Atomic oxygen	2.42
Ozone	2.07
Hydrogen peroxide	1.77
Hypobromous acid	1.59
Chloride dioxide	1.5
Hypochlorous acid	1.49
Hypoiodous acid	1.45
Chlorine	1.36
Bromide	1.09

ในทางทฤษฎี กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การใช้สารเคมีแบบดั้งเดิม (Classical chemical treatment) 2) การใช้สารเคมีแบบประยุกต์ (Advanced oxidation process: AOPs) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้สารเคมีแบบประยุกต์ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเรดิคัล (radical) ที่มีความว่องไวสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้จะไปทำลายโมเลกุลของสารประกอบที่เป็นพิษทำให้น้ำเสียมีความสะอาดมากขึ้น โดยทั่วไปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นของสารที่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปกติแล้วจะอยู่ในช่วง $10^8 - 10^{11}$ วินาที⁻¹ และความเข้มข้นของไฮดรอกซิลเรดิคัลจะอยู่ระหว่าง $10^{-10} - 10^{-12}$ โมลต่อลิตร ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งคือ 10^{1-10} ถึง 1 วินาที⁻¹ สารประกอบที่มีผลต่อไฮดรอกซิลเรดิคัลและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารแสดง (ดังตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล (จันทนา และ จิตติมา, 2546)

สารประกอบ	
กรด	formic , gluconic , lactic , malic , propionic , tartic
แอลกอฮอล์	benzyl , <i>tert</i> -butyl , ethanol , ethylene glycol , glycerol , isopropanol , methanol , propendiol
แอลดีไฮด์	acetaldehyde , benzaldehyde , trichloroacetaldehyde
อะโรมาติก	benzene , chlorobenzene , chlorophenol , creosote , dichlorophenol , hydroquinone , p-nitrophenol , phenol , toluene , trichlorophenol , xylene , trinitrotoluene
เอมีน	aniline , cyclic amines , diethylamine , dimethylformamide , EDTA , propanediamine , n-propylamine
คีโตน	anthraquinone , diazo , monoazo
อีเทอร์	Tetrahydrofuran
คีโตน	dihydroxyacetone , methyl ethyl ketone

2.12 ประเภทของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน(AOPs)

ในทางทฤษฎี เราสามารถจำแนกประเภทของ AOPs สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) Homogeneous และ 2) Heterogeneous (มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ) โดยกระบวนการต่าง ๆ แสดง (ดังตารางที่ 2.5)

ตารางที่ 2.5 ประเภทของ AOPs (จันทนภาและจิตติมา, 2546)

ประเภท			กระบวนการ
ปฏิกิริยา	ปัจจัยภายนอก	กระบวนการทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรคทีเคิล	
Homogeneous	แสง	Photochemical Process/ Chemical Process	UV / O ₃ UV / H ₂ O ₂ UV / H ₂ O ₂ / O ₃ UV / Fe ²⁺ (Fe ³⁺) / H ₂ O ₂
	แสง/ Ultrasound	Photochemical/Sonochemical	UV / US
	Ultrasound	Sonochemical process	US / H ₂ O ₂ US / O ₃
	High-energy	Ionising	Electron Beam
	-	Chemical	H ₂ O ₂ / O ₃
	-	Chemical	O ₃ / H ₂ O ₂ / high pH
	-	Chemical	Fe ²⁺ / H ₂ O ₂ (Fenton)
	-	Electrochemical	Electro-Fenton
Heterogeneous	แสง	Photochemical Process	UV / TiO ₂ / O ₂ UV / TiO ₂ / H ₂ O ₂
	-	Chemical	Iron Oxide / H ₂ O ₂

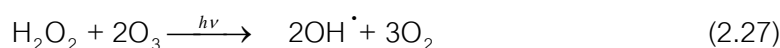
ทั้งนี้ ในกระบวนการ AOPs มีวิธีที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลอยู่หลายทาง ซึ่งกระบวนการหลัก ๆ ที่จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลนั้นจะแสดงได้ดังนี้

2.12.1 แสง UV (Heterogeneous) การใช้แสง UV เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่มีจลนพลศาสตร์ที่ช้าโดยแบ่งออกเป็น

- $\text{Fe}^{3+}/\text{UV-vis}$ process กระบวนการนี้จะไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่จะอาศัย $\text{Fe}[(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ เป็นแหล่งที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลแทน โดยพบว่าร้อยละผลให้ที่เกิดขึ้นคือ 0.075 โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ ดังนี้ (เมื่อ $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ มาจากการแตกตัวของ $\text{Fe}[(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]$)



- $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ process ในกระบวนการของ AOPs ที่มีแสง UV และโอโซนนั้นจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา photolysis ของโอโซน ซึ่งโอโซนจะเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ คือ



พบว่าในระบบนี้มีตัวที่จะทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลอยู่ 3 ชนิด คือแสง UV, โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- UV/TiO_2 (Heterogeneous photolysis) UV/TiO_2 วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการซึ่งจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีออกซิเจนโดยไฮดรอกซิลแรดิคัลจะเกิดขึ้นด้วยกระบวนการ heterogeneous photolytic ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 เฟส คือ เฟสของแข็งกับของเหลว วิธีนี้มีข้อดีคือเป็นวิธีที่ให้ผลดีและราคาถูกแต่มีข้อเสียคือจะต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากรู้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัด

2.12.2 H₂O₂ – based process

ส่วนใหญ่การบำบัดโดยใช้กระบวนการ advanced oxidation จะใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลดังนี้ คือ

- H₂O₂/UV
- H₂O₂/O₃ process
- Fenton and Photo-fenton process

2.12.3 H₂O₂/UV process

กลไกส่วนใหญ่ของปฏิกิริยา photolysis ที่ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮดรอกซิลแรดิคัล คือ



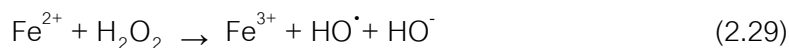
ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร

ในกระบวนการนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานที่มีไอโซนพบว่าเป็นวิธีที่ถูกกว่าและมีการเกิดแรดิคัลอย่างแน่นอน โดยไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นสามารถทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด นอกเหนือจากกระบวนการขั้นต้นที่กล่าวมาแล้วกระบวนการเฟนต์ันเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่สามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้เช่นกัน โดยการทำปฏิกิริยาของเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล เมื่อทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะช่วยลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ เนื่องจากกระบวนการเฟนต์ันต้องใช้เฟอร์รัสไอออนในการร่วมทำปฏิกิริยา ดังนั้นเราจึงนำกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้ามาช่วยด้วย เพื่อผลิตเฟอร์รัสไอออนในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้

2.13 ปฏิกิริยาเฟนต์ัน (Fenton Reaction)

ปฏิกิริยาเฟนต์ันถูกค้นพบโดย H.J. Fenton ในปี 1896 หลังจากนั้นสี่สิบปี Haber-Weiss ได้เสนอกลไกที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของปฏิกิริยา Fenton ที่ทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ปฏิกิริยาเฟนต์ันเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันแบบประยุกต์ (Advanced oxidation) คือกระบวนการที่ใช้ OH[·] (Hydroxyl radical) เป็นตัวออกซิเดชัน ในกระบวนการเฟนต์ันจะเป็นการทำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) แตกตัวกลายเป็น OH[·] โดยใช้เฟอร์รัสไอออน (Fe²⁺) ทำปฏิกิริยา

กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ $\text{OH} \cdot$ มีเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นผลิตภัณฑ์ $\text{OH} \cdot$ ที่เกิดขึ้นมานั้นจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆทำให้ค่าซีโอดีในน้ำเสียลดลง ดังสมการ (2.29)



2.13.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสารเคมีเฟนตัน (Fenton's Reagent)

สารเคมีเฟนตันนั้นเป็นการผสมกันระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับ เหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+}) โดยมีเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูง โดยสูงเป็น 200% ของ คลอรีน และสูงกว่าโอโซน (O_3) 25% โดยมีค่าสูงรองจาก ฟลูออรีน (Fluorine) เท่านั้น โดยแสดง ลำดับศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) (ดังตารางที่ 2.3)

ความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงของไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งได้จากสารเคมีเฟนตันนั้นทำให้มีการนำสารเคมีเฟนตันไปใช้ในงานกันอย่างกว้างขวาง ในกระบวนการบำบัดของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางด้านน้ำ อากาศ ดิน ตลอดจนใช้บำบัดของเสียอันตรายด้วย

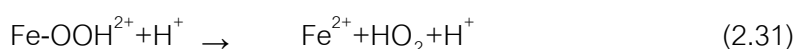
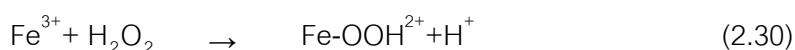
2.13.2 ข้อได้เปรียบปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับกระบวนการออกซิเดชันอื่น

- เหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ
- มีการถ่ายโอนมวลสารอย่างไม่จำกัด เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบ

Homogeneous

- ไม่ต้องการแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและออกแบบระบบง่ายกว่าการใช้ระบบแสง UV

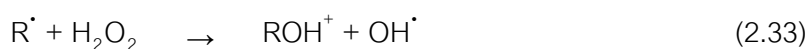
ในการทดลองสามารถควบคุมสภาวะเงื่อนไข ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันจากเฟอร์ริกไอออนกลับไปเป็นเฟอร์รัสไอออนได้โดย การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ ดังสมการ (2.30) – (2.31)



$\text{HO}_2\cdot$ แรดิคัลเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถออกซิเดชันสารประกอบอินทรีย์ได้ แต่แรงออกซิเดชันยังคงน้อยกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมากกว่า ไฮดรอกซิลแรดิคัลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเฟนตันทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ตั้งต้น (RH) จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็น organic radical ($\text{R}\cdot$) ดังสมการ (2.32)



Organic radical สามารถเปลี่ยนรูปชั่วคราวได้โดยการออกซิไดซ์ของ เพอร์ริกซิออน ออกซิเจน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังสมการ (2.33) - (2.36)



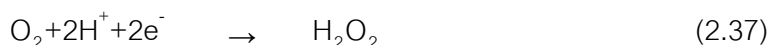
2.14 กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process)

กระบวนการ Electro-Fenton (EF) เป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในกำจัดอนุภาค โดยการสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลไปออกซิไดซ์อนุภาคที่อยู่ในน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาเฟนตันที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างเพอร์ริกซิออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัล ตามสมการ 2.29 โดยในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันนั้น เป็นกระบวนการที่นำกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีมาประยุกต์ใช้ร่วม ซึ่งส่งผลให้สามารถสร้าง เพอร์ริกซิออนหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้จากขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปและเกิดการกัดกร่อนปล่อยออกซิเจนออกมาในการทำปฏิกิริยา ในการทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียตกตะกอนและถูกออกซิไดซ์ด้วย กระบวนการ Electro-Fenton สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

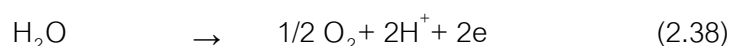
2.14.1 EF- H_2O_2 การที่อิเล็กโทรไลต์ผลิต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟต์ โดยขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ เมื่อทำปฏิกิริยากับ (2H^+) จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในส่วนด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการสูญเสีย 2 อิเล็กตรอนของน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ($\frac{1}{2} \text{O}_2$) และ (2H^+) โดยปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) ดังสมการ (2.37) – (2.39) ข้อเสียเปรียบ

ของ กระบวนการ Electro-Fenton คือ ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าจะต่ำในสภาวะที่สารละลายเป็นกรด ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

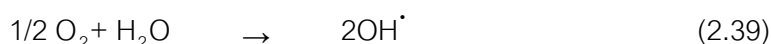
Cathode



Anode

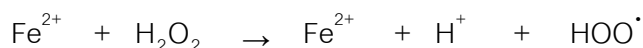
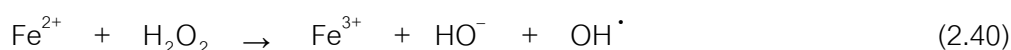


Redox



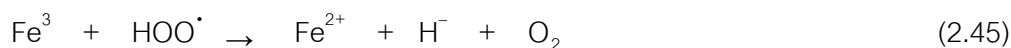
2.14.2 เป็นการใช้น้ำ H_2O_2 ร่วมกับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เพื่อสร้างปฏิกิริยา เฟนตัน โดยนำกระบวนการเติมสารออกซิแดนท์มาใช้ (H_2O_2) ร่วมกับเฟอร์รัสไอออนที่มาจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ขั้วแอโนดจะเป็นแหล่งกำเนิดเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เมื่อเฟอร์รัสไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น เฟอร์ริกไอออนและไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ดังสมการ (2.40) เราจึงเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

จากสมการ (2.40) – (2.45) ในการเกิดเรดิคัลของ OH^\cdot และ HOO^\cdot ขึ้นอยู่กับ Fe^{2+} , Fe^{3+} และ H_2O_2 โดยในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันสามารถรีดักชัน เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ให้เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ได้ดังสมการ (2.45) โดยขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะที่เป็นกรดและไร้ออกซิเจนซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดการออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) แต่จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ การเกิด OH^\cdot จะขึ้นกับประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



(2.41)





กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process) เป็นกระบวนการที่ช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขั้วแอโนด จะผลิตเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ออกมา เมื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดกระบวนการเฟนตัน โดยกระบวนการเฟนตันสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) จากการที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ที่ขั้วแคโทด ดังสมการ (2.40) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) สามารถช่วยในการทำลายโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ และเป็นกรดปริมาณซีไอดีในน้ำเสียเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณออกซิเจนในน้ำ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และลักษณะเฉพาะน้ำเสีย เช่น ปริมาณสารที่สามารถเกิดโมเลกุลเชิงซ้อนกับเหล็กได้ดี ความเป็นอิออนของสารและสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot})

2.15 กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน (Photo Electro Fenton)

ในกระบวนการ Electro-Fenton แสง UV สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะมีผลกระทบต่อปริมาณของเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ (Fe^{2+}) โดยเราจะเรียกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน (Photo Electro Fenton) กระบวนการนี้สามารถรีเจนเนอเรต เพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ (Fe^{2+}) ได้ในอัตราที่สูง จึงได้มีการนำแสง UV มาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน (Fenton) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น

2.15.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน (Photo Electro Fenton)

- การเกิด Photodecomposition ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบประเภท เพอร์ริกอิออน (Fe^{3+}) ที่เกิดจากกรด Carboxylic acid ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) ลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง
- การรีเจนเนอเรตเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ (Fe^{2+}) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิด ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) มากขึ้น จากการใช้แสง UV ในการ reduction เพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ (Fe^{3+}) แสง UV ช่วงความยาวคลื่นของแสงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 180 - 480 นาโนเมตร) โดยจะนิยมใช้แสงในช่วง UV

หรือ Visible light เนื่องจากกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพดีและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียน้อยจึงได้มีการตีพิมพ์อย่างแพร่หลาย ดังนั้นเราจึงได้สนใจศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ร่วมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน

กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน มีส่วนช่วยในการ reduction เฟอริกอิออน (Fe^{3+}) และเฟอริกคอมเพล็กซ์ (Ferric complex) โดยเป็นกระบวนการ oxidation ของวัฏจักรระหว่างเฟอรัสอิออนและเฟอริกอิออน โดยสามารถนำเฟอรัสอิออนกลับมาใช้ได้อย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\cdot) จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแสง UV และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม การใช้แสง UV จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\cdot) มากกว่ากระบวนการเฟนตันเพียงอย่างเดียว

สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Photo electro Fenton นั้นจะขึ้นกับการเพิ่มรังสีของแสง UV ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงของเฟอรัสอิออน (Fe^{2+}) photoreduction ของเฟอริกอิออน (Fe^{3+}) แสดงได้ดังสมการ (2.47) - (2.48)



ในปฏิกิริยา Fenton และ Photo-Fenton นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณเฟอรัสหรือเฟอริกอิออน (Fe^{3+}) ที่เติมเข้าไปเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ที่ใช้ในกระบวนการด้วย

ตารางที่ 2.6 กลไกในการเกิดปฏิกิริยากระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน

กระบวนการ	กลไกเกิดปฏิกิริยา	แหล่งอ้างอิง
Ozone/UV	$\text{O}_3 \xrightarrow{h\nu} \text{O}_2 + \text{O}({}^1\text{D})$ $\text{O}({}^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH}^\cdot$ $2\text{OH}^\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	Zhou and Smith (2002)
Ozone/Hydrogen peroxide	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{OH}^\cdot + 3\text{O}_2$	Zhou and Smith (2002)
Hydrogen peroxide/UV	$\text{H}_2\text{O}_2 \xrightarrow{h\nu} 2\text{OH}^\cdot$	Zhou and Smith (2002)
Fenton Chemistry	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^\cdot + \text{OH}^-$ $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{OOH}^\cdot + \text{H}^+$	Dai et al. (2008)

จากตารางที่ 2.6 แสดงถึงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (AOPs) เป็นกระบวนการที่ผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งจะเป็เป็นตัวที่ช่วยในการทำลายโมเลกุลของสารประกอบที่เป็นพิษ เนื่องมาจากกระบวนการ AOPs มีวิธีที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลอยู่หลายทาง โดยสารที่ทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล มีอยู่ 3 ชนิด คือ แสง UV โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการเฟนตันมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดได้มากกว่า 90% (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) ซึ่งสารเคมีเฟนตันนั้นคือการทำงานร่วมระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเหล็ก ($\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$) โดยมีเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl radical)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เล็งเห็นถึงประสิทธิภาพในการบำบัดโดยกระบวนการเฟนตัน จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เพื่อเป็นการลดปริมาณในการเติมสารเคมี เนื่องมาจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นกระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วเหล็ก เพื่อผลิตเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เพื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งจะช่วยในการลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน นอกจากกระบวนการข้างต้นแล้ว แสง UV เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (ดังแสดงตารางที่ 2.6) เนื่องมาจากเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาร่วมกับแสง UV จะผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลค่าเข้มข้น

สูงกว่ากระบวนการข้างต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแสง UV มาประยุกต์ใช้ร่วมในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.16.1 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

Bensadok และคณะ (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า น้ำมันตัดที่ปนเปื้อนเป็นน้ำมันแร่ ชนิด B22 ใช้ในกระบวนการบำรุงรักษาเครื่องจักร โดยน้ำเสียมีค่าความเข้มข้นซีไอดีและความขุ่น $\approx 62,000$ และ $26,400$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการเมมเบรน ทำการเดินระบบแบบทีละเท (Batch) โดยถังปฏิกรณ์มีขนาด $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ซีไอดี ความขุ่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้นและความเข้มข้นของน้ำมัน จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าค่าความเข้มข้นของน้ำมันจะลดลง เนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์ละลายในน้ำได้มากประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น โดยใช้อะลูมิเนียม 10 มิลลิกรัมต่อน้ำมัน 1 กรัม ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 6 - 7 สามารถบำบัดซีไอดี และความขุ่นได้ 92 และ 99% ตามลำดับ ถึงแม้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงแต่น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยการรวมตะกอนทางไฟฟ้ายังไม่ผ่านมาตรฐาน จึงได้นำกระบวนการเมมเบรนมาบำบัดในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากน้ำมันตัดเป็นน้ำมันที่ละลายน้ำและมีปริมาณซีไอดีและค่าความขุ่นสูง ซึ่งทำให้ยากต่อการบำบัดโดยกระบวนการทั่วไป

วิฑูรย์ กิตติถาวร และคณะ (2553) งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นโดยใช้ดินเปรี้ยวสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับ ทำการศึกษากลของปริมาณดินเปรี้ยวสังเคราะห์ ความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อเย็น โดยการทดลองแบบทีละเท พบว่าปริมาตรพรุนและพื้นที่ผิวของดินเปรี้ยวสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 4.90×10^{-4} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 8.96×10^{-1} ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น มีค่ามากถึง 84.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็น 1.00% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 303

เคลวิน ไอโซเทอมของการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นสอดคล้องกับสมการบีอีที ในขณะที่จลนศาสตร์การดูดซับน้ำมันหล่อเย็น สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง กลไกการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น โดยใช้ดินเปรี้ยวสังเคราะห์เกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ภายหลังการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น

2.16.2 กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

Ayhan และMahmut (2006) การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจากน้ำเสียอุตสาหกรรมนม โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า น้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมนมจะมีปริมาณไขมันและน้ำมันสูง โดยมีค่าซีไอดีและค่าไขมันและน้ำมัน 18,300 และ 4,570 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในนมจะมีสารอาหารต่างๆปริมาณมาก น้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะอยู่ในรูปอิมัลชันและมีปริมาณไขมันและน้ำมันสูง โดยน้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้น 6 – 7.5 และค่าซีไอดี 18,300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวแปรที่ทำการศึกษา ค่าพีเอชเริ่มต้น ปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและค่าความต้องการพลังงาน ทำการติดตั้งถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดยมีขนาดแผ่นขั้วอิเล็กโทรด 10x5x0.2 เซนติเมตรและมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา 0.0333 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2.5 เซนติเมตร

จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและปริมาณไขมันและน้ำมัน โดยในน้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้น 6 - 7 ซึ่งเหมาะกับขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็ก โดยจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและปริมาณไขมันและน้ำมันได้ดี และเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและปริมาณไขมันและน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 1.2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและปริมาณไขมันและน้ำมัน 98% และ 99% ตามลำดับ

Bejankiwar (2002) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยาสูบ โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยน้ำเสียก่อนการบำบัดมีค่าสารแขวนลอย ซีไอดีและบีไอดีเริ่มต้น 356 1,245 และ 540 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับก่อนและหลังการตกตะกอนทางเคมีด้วยปูนขาว โดยใช้เหล็กหล่อเป็นอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า 3.5 แอมป์ ระยะเวลาเก็บ 5 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวของขั้ว 32 ตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพการกำจัด ซีไอดี และบีไอดีเป็น 56% และ 84%

ตามลำดับ และใช้กระบวนการนี้ก่อนและหลังจากการตกตะกอนทางเคมี จะได้ประสิทธิภาพรวมในการกำจัดสารแขวนลอยคือ 80.59% และ 74.62% :ซีไอดี คือ 71.01% และ 81.35% และบีไอดี คือ 89.62% และ 95.66% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยาสูบ

กระบวนการ	ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี (%)	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)	ประสิทธิภาพการบำบัดสารแขวนลอย (%)
Electro-Coagulation	84.00	56.00	-
(EC)+การตกตะกอนทางเคมี	81.35	71.01	80.59
การตกตะกอนทางเคมี+(EC)	95.66	89.62	74.62

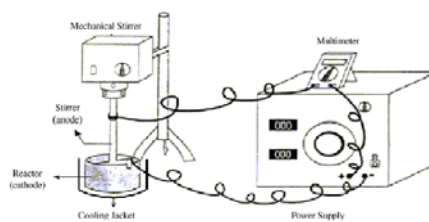
Koby และคณะ (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบจากการใช้ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่ค่าความเข้มข้นซีไอดีและความขุ่นเริ่มต้น (3,422 มิลลิกรัม/ลิตร และ 5,700 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยใช้ขั้วเหล็กและอะลูมิเนียม ทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบมอโนโพลาร์ ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการบำบัดต่อการลดลงของค่าซีไอดีและค่าความขุ่น จากการทดลองพบว่า การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยที่ช่วงภาวะกรดอ่อน (พีเอช < 6) ขั้วอะลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดังนี้ ความขุ่น 98% และ ซีไอดี 65% ขณะที่ช่วงภาวะเป็นกลางขั้วเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ดังนี้ ความขุ่น 98% และ ซีไอดี 77% และระยะเวลาในการบำบัด ที่เหมาะสม 10 นาที พบว่าขั้วเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 - 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในขณะที่ขั้วอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุด ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

Chen และYue (2000) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันจากร้านอาหารด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด อุปกรณ์ในการวิจัยประกอบด้วย ถังปฏิกริยาขนาด 0.3 ลิตร ถังแยกสลัดจ์ขนาด 1.2 ลิตร ขั้วไฟฟ้าขนาด 140x44x3

มิลลิเมตร จำนวน 5 ขั้ววางห่างกัน 6 มิลลิเมตร โดยมีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 56 ตารางเซนติเมตร/ขั้ว น้ำเสียที่ศึกษามาจากโรงอาหารใน HongKong University of Science and Technology (HKUST) จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาในการกักเก็บที่เหมาะสม คือ 15 นาที และเวลาในการตกตะกอน 1.5 ชั่วโมง ในปฏิกิริยาขนาด 2 ลิตร ผลจากการวิจัยพบว่า กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหารได้ ส่วนค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำที่เข้าระบบ โดยได้ค่า charge loading 1.67 – 9.95 ฟาราเดย์/ลูกบาศก์เมตรและกระแสไฟฟ้า 30 – 80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้วอะลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษา 17.7 - 106.4 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียที่ทดลอง พลังงานที่ต้องการน้อยกว่า 1.5 กิโลวัตต์/ลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันมากกว่า 94% และสามารถปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นกลางได้

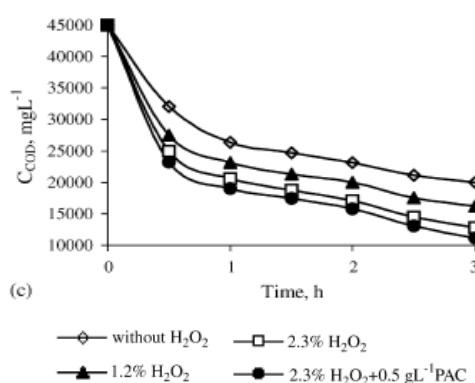
Inan และคณะ (2004) ศึกษาการลดค่า ซีไอดี ดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมะกอกจากโรงงานไม้แป๊ง โดยทำการติดตั้งถังขนาด 15x8x8 เซนติเมตรซึ่งขั้วไฟฟ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัส 35 ตารางเซนติเมตร ทั้งขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็ก โดยมีระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร จากการศึกษาพบว่าที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 10 - 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าพีเอชเท่ากับ 4 6 7 และ 9 บำบัดเป็นเวลาน้อยกว่า 30 นาที เมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมสามารถลดค่าซีไอดีได้ 52% โดยน้ำหนักขั้วอะลูมิเนียมที่สลายไปเท่ากับ 0.168 กรัม โดยน้ำหนักเหล็กที่สลายไปเท่ากับ 0.522 กรัม นอกจากนี้ยังทำการทดลองที่ภาวะพีเอชเท่ากับ 6.2 + 0.2 เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าซีไอดีก็จะลดลงมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้จะสามารถลดค่าซีไอดีได้แล้ว ยังสามารถลดดีเอสและของแข็งแขวนลอยได้ปริมาณมาก โดยประสิทธิภาพในการลดดีเอส 96% ทั้งขั้วเหล็กและอะลูมิเนียม

Tezcan และ คณะ (2006) ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งมีค่าซีไอดีน้ำเสียเริ่มต้น $\approx 45,000$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษา ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณการเติมสารเคมี ค่าพีเอชเริ่มต้น ระยะเวลาการกักเก็บ ทำการติดตั้งถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเท ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การติดตั้งถึงปฏิกรณ์

โดยในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า 2) กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารเคมี จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการกักเก็บที่เหมาะสม คือ 3 ชั่วโมง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 20 - 75 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การเติมปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสีย โดยในการทดลองแรกประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีของซั้วที่ทำจากอะลูมิเนียมและเหล็กเท่ากับ 76% และ 86% ตามลำดับ การทดลองที่ 2 การทดลองโดยการเติมสารเคมีในกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าที่ใช้ซั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด โดยสารเคมีที่เติมคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ PAC ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น ส่วนสาร PAC เป็นสารโคแอกกูแลนต์ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้เพิ่มมากขึ้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีโดยการเติมสารเคมี

Xinhua และ Xiangfeng (2004) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจากโรงอาหารโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เนื่องจากน้ำเสียที่มาจากโรงอาหารจะมีปริมาณไขมันและน้ำมันปริมาณสูง โดยมีค่าซีไอดีและค่าน้ำมันแลไขมันในน้ำเสียเริ่มต้น $\approx 1,000$ และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ซั้วไฟฟ้าเหล็ก ที่มีขนาด 200x100x3 มิลลิเมตร และทำการติดตั้งซั้วไฟฟ้าแบบมอโนโพลาร์ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าการนำไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างซั้วและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย จากการศึกษาพบว่า การใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

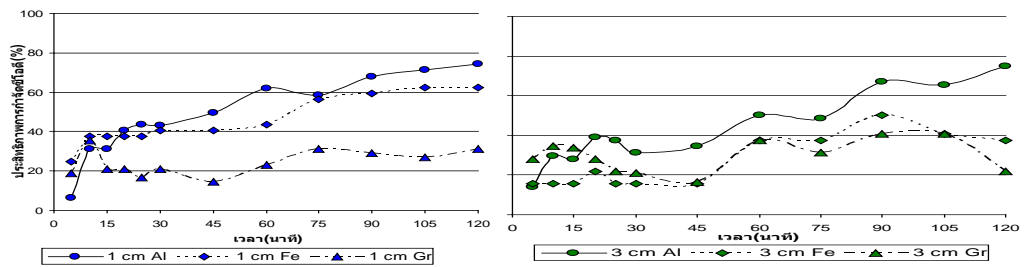
ในการกำจัดซีไอดี ไชมันและน้ำมัน ได้มากกว่า 75% และ 95% ตามลำดับ ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาทีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 - 14 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พีเอชระหว่าง 3 - 10 และระยะห่างระหว่างขั้ว 10 มิลลิเมตร ค่าสภาวะที่เหมาะสมจะขึ้นกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย โดยค่าการนำไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยมาก เนื่องจากเมื่อค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่อความต้องการพลังงาน ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงขึ้น ในการเติมเกลือไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้แต่สามารถช่วยลดค่าความต้องการทางพลังงานได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายการบำบัด

Koby และคณะ (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำมันที่มาจากกระบวนการตัดกลึงโลหะโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมการตัดกลึงโลหะในประเทศตุรกี น้ำเสียที่นำมาวิจัยเป็นน้ำเสียที่มากจากกระบวนการหล่อเย็นและการใช้น้ำมันหล่อลื่น ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำ 3 - 60% โดยทำการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็กและอะลูมิเนียม ขนาด 45x53x3 มิลลิเมตร โดยน้ำเสียเริ่มต้นมีปริมาณซีไอดี 26,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดต่อการลดลงของค่า ซีไอดีและความขุ่น จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยที่ช่วงภาวะกรดอ่อน (พีเอช < 6) ขั้วอะลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ 93% ขณะที่ช่วงภาวะเป็นกลางระหว่าง 3 - 7 ขั้วเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ 92% โดยมีระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร และระยะเวลาในการบำบัด 25 นาที ขั้วไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 - 60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ถึงแม้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูง แต่เนื่องจากน้ำเสียที่มาจากกระบวนการตัดกลึงโลหะจะมีค่าซีไอดีและปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงไม่ผ่านมาตรฐานจึงต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นที่สองในการลดปริมาณความเข้มข้นซีไอดีและสารอินทรีย์

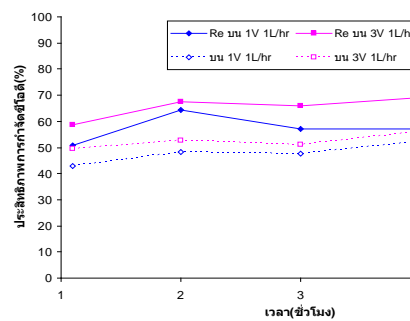
ปาริชาติ หมิ่นสีทา (2547) ศึกษาการกำจัดซีไอดีและซีไอที จากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยน้ำเสียที่ทำการวิจัยมาจากกระบวนการบำบัด 2 กระบวนการ คือ น้ำเสียจากบ่อบ่ม และน้ำเสียจากบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า มีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ

ค่าเวลาเก็บกัก ค่าใช้จ่ายในการบำบัด จากการศึกษาพบว่าในระยะเวลาการกักเก็บ 30 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากบ่อบ่มมีประสิทธิภาพสูงกว่าบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยน้ำเสียจากบ่อบ่มและน้ำเสียจากบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี 51.84% และ 56.88% ตามลำดับ ส่วนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมของบ่อบ่มและบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 10 โวลต์และ 12 โวลต์ โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 65.21 บาทต่อลูกบาศก์เมตรและ 59.49 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับซึ่งเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์หรือเวลาเก็บกัก จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นแต่จะทำให้อุณหภูมิและพีเอชสูงขึ้นเช่นกัน โดยจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ควบคุมระบบได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีและซีไอดี โดยค่าประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ องค์ประกอบ เช่น ชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้าและเวลาเก็บกักเป็นต้น ดังนั้นในการเลือกระบบนี้มาใช้งานจึงต้องหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของน้ำเสียชนิดนั้น ๆ ก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริง

สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 5,000 กรัม/ลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบแบบทีละเท และแบบต่อเนื่อง เช่น ความสูงของขั้วตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าการใช้ขั้วเหล็กและขั้วแกรไฟต์ที่ระยะห่างต่างๆ จากภาพที่ 2.12 ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการตกตะกอนและลอยตะกอนทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันในด้านความสามารถในการละลายของอิมัลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมัน ความว่องไวในการทำปฏิกิริยา รวมถึงข้อจำกัดการทำให้ลอยตัวด้วยฟองก๊าซ ทั้งนี้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ โคอะเลสเซอร์ ที่ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 5 ลิตรต่อชั่วโมงนั้นพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดกว่า 2 เท่า จากภาพที่ 2.13 เมื่อเดินระบบที่ค่าความต่างศักย์ต่ำๆ ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและการนำน้ำมันกลับมา



ภาพที่ 2.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ชนิดขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 2.13 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์วางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน

อัญชลี ศรีรังสรรค์ (2551) การบำบัดน้ำเสียไปโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ทำการติดตั้งถึงปฏิกรณ์โดยเดินระบบแบบที่ละเท และน้ำเสียที่ทำการวิจัยมีค่าพีเอชเริ่มต้นประมาณ 6 - 7 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและชนิดของขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ดังนี้ 1) เหล็ก-เหล็ก 2) เหล็ก-แกรไฟต์ 3) แกรไฟต์-แกรไฟต์ 4) อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ 5) อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม จากการศึกษาพบว่า ชนิดขั้วไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด คือ ขั้ว อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ค่าของแข็งละลายน้ำ ปริมาณน้ำมันและไขมัน 55.68% 97.50% และ 97.83% ตามลำดับ น้ำหนักที่ขั้วสลายไปเท่ากับ 0.145 กรัม สามารถผลิตก๊าซที่เกิดขึ้น 390 มิลลิลิตร ใช้ค่าพลังงานเท่า 6.92 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร เสียค่าไฟฟ้าในการบำบัดเท่ากับ 13.36 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ปฏิกิริยากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น เฟอริกไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารรวมตะกอน โดยสารเหล่านี้จะรวมตัวกับ

สารอินทรีย์ต่างๆที่แขวนลอยในน้ำ และถูกพาขึ้นสู่ด้านบนผิวน้ำ โดยการไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยา ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะใส มีสารแขวนลอยและปริมาณน้ำมันและไขมันต่ำ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะอยู่ในสภาวะเป็นกลาง

สรุป กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ควบคุมระบบได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีและซีโอดี โดยค่าประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับหลายๆองค์ประกอบ เช่น ชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้าและเวลากักเก็บ ซึ่งคุณลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า จะมีลักษณะ ดังนี้ คือ ค่าพีเอชในน้ำเสียจะเพิ่มสูงมากขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 7 - 11 ค่าการนำไฟฟ้าน้ำเสียก่อนการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 11.45 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แต่หลังจากผ่านกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจะเกิดปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณไอออนที่ใช้ทำปฏิกิริยา เนื่องจากปริมาณไอออนมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ถ้าปริมาณไอออนลดลงค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงตามไปด้วย โดยหลังการทดลองค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10.56 - 14.08 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จากการวิจัยพบว่าปริมาณของโลหะไอออนที่ละลายในน้ำจะสามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ ซึ่งจะขึ้นกับระยะเวลาในการกักเก็บและค่ากระแสไฟฟ้า โดยปริมาณไอออนของโลหะที่ละลายในน้ำจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 400 มิลลิกรัมขึ้นไป และประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไอซีสามารถบำบัดได้ 82% (Koby และคณะ, 2007)

2.16.3 กระบวนการเฟนตัน (Fenton process)

Sheng และMing (1997) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 โดยกระบวนการ Fenton process ควบคู่กับ Ion Exchange เพื่อบำบัดสีซีโอดีและความขุ่น พบว่าการบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธี Fenton process สามารถลดสี ค่าความขุ่นและซีโอดีได้ดี ในกระบวนการ Ion Exchange สามารถลดค่าซีโอดีและปริมาณเฟอร์รัส (Fe^{3+}) ไอออนที่เกิดจากวิธี Fenton ได้ ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ควบคู่กันทั้งสองกระบวนการ เนื่องจากกระบวนการเฟนตันสามารถบำบัดซีโอดีได้ 67% และเมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการเฟนตันไปบำบัดต่อในกระบวนการ Ion Exchange ทำให้ประสิทธิภาพมากกว่า 93%

ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโน-เฟนตัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (cutting oil wastewater) ที่ยากต่อการบำบัดด้วยวิธีการทั่วไป โดยมีค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้น 3,500-26,000 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มของคลื่นความถี่เหนือเสียง (ultrasonic intensity) อุณหภูมิของปฏิกิริยา ความเข้มข้นน้ำมัน รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์ด้วยการเติมสารออกซิแดนซ์ชนิดอื่น อาทิเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การเติมอากาศ และการใช้สารเฟนตันอีกด้วย

จากการศึกษาพบว่า การใช้อะคูสติคออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ โดยมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากคุณลักษณะเฉพาะของน้ำเสียชนิดนี้ เนื่องจากน้ำมันตัดมีขนาดเล็กและมีค่าความคงตัวสูง อย่างไรก็ตาม การใช้สารเฟนตันร่วมกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงนั้นจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึง 92.3% โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 140 กรัมและสารเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลิตรของน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อเฟอร์รัส) ซึ่งเป็นปริมาณที่สูง แต่ก็สามารถลดปริมาณเพื่อให้ได้มาซึ่งการกำจัดที่เหมาะสมได้ด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (reaction kinetic)

2.16.4 กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน (Electro fenton process)

Zhang และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบโดยใช้กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน น้ำเสียเริ่มต้นมีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ เวลาในการบำบัด ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้า อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสอิออนปริมาณของ Fenton's reagent และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการศึกษพบว่า การใช้กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันนั้นมีประสิทธิภาพดีมากในการลดขนาดโมเลกุลสารอินทรีย์ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วมากใน 30 นาทีแรกและจะช้าลงจนเสร็จสิ้นปฏิกิริยาภายใน 75 นาที ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีผลในการลดค่าซีโอดีถึง 7% การเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าจะช่วยให้การบำบัดมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มถึงค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพจะลดลงโดยปริมาณของสารช่วยตกตะกอนให้ผลไปแนวทางเดียวกันกับปริมาณกระแสไฟฟ้า อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสอิออนที่เหมาะสมคือ 0.038 โดยการใช้กระบวนการอิเล็ก

โทรเฟนต้นนั้น ช่วยลดค่าซีไอดีได้มากกว่าการใช้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเคมีคอลและกระบวนการเพนตันเพียงอย่างเดียว

Atmaca (2009) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนต้น น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษามาจากหลุมฝังกลบในเมือง Siavas ประเทศตุรกี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็กที่มีขนาด 4x5 เซนติเมตร ทำการต่อแบบขนานภายในถังปฏิกรณ์ จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากกระบวนการเพนตันสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงสภาวะพีเอชต่ำ อยู่ระหว่าง 2 - 4 เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงมากกว่า 50% การกำจัดสี ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3 - 3.5 จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียม-ไนโตรเจนและฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะที่เหมาะสมจะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้มากขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเท่ากับ 2 แอมแปร์ ระยะเวลาในการกักเก็บ 20 นาที และมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด สามารถกำจัด ซีไอดี, สี, แอมโมเนียม-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ได้ 72 90 26 และ 87% ตามลำดับ แต่แอมโมเนียม-ไนโตรเจนมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำเนื่องจาก $\text{NH}_4\text{-N}$ ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยไฮดรอกซิลเรดิเคิล จึงไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนียม-ไนโตรเจนสูงๆ

มารุต โปราณานนท์ (2547) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนต้น โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเดินระบบแบบที่ละเทและระบบต่อเนื่อง น้ำเสียที่ได้มาจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันในปริมาณมาก ตัวแปรที่ใช้ศึกษา คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลวนของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียระบบที่ละเท คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 มิลต่อลิตร โดยภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันเริ่มต้น 150 - 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ใกล้เคียงกันกล่าวคือสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดีและบีไอดี ที่เวลา 45 นาที ได้ 93.9 89.2 และ 88.9%

ตามลำดับ ส่วนที่สองจะเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในระบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในระบบต่อเนื่องคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร ป้อนแบบจังหวะด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที สามารถลดน้ำมันและไขมัน ซีไอดีและบีไอดี 92.5 79.6 และ 69.8% ตามลำดับ

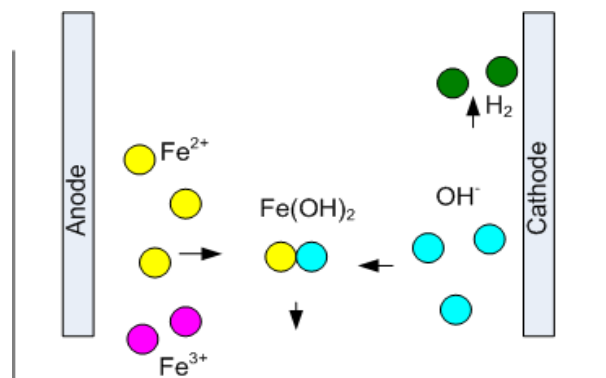
2.16.5 กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน (Photo electro fenton process)

Shyn และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดซีไอดีและบีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดกรณีที่ใช้ $H_2O_2/UV/Fe^{2+}$ และ H_2O_2/Fe^{2+} จากการวิจัยพบว่า $H_2O_2/UV/Fe^{2+}$ สามารถลดค่าซีไอดี ได้ 80%และลดบีไอดีได้ 90% H_2O_2/Fe^{2+} สามารถลดทั้งซีไอดีและซีไอดี ได้ 80 % ส่วน H_2O_2/UV^+ สามารถลดซีไอดีและซีไอดี ได้เพียง 10% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการใช้แสง UV จะมีผลต่อการลดลงของสีเนื่องจากปฏิกิริยา Photoreduction ของเฟอร์ริกไอออนเปลี่ยนรูปไปเป็นเฟอร์รัสไอออน เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์รัสไอออนและความเข้มของแสง UV ทำให้ประสิทธิภาพการลดลงของสีเพิ่มมากขึ้น

Philippopous และคณะ (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแสง UV ที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบที่ละเทชนิดหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำการศึกษาผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าพีเอชเริ่มต้นและการเติมเฟอร์ริกไอออนต่อการลดลงของค่าซีไอดีและการย่อยสลายสารประกอบต่างๆในน้ำเสีย พบว่าสามารถลดค่า ซีไอดีและการย่อยสลายสารประกอบต่างในน้ำเสียพบว่าสามารถลดค่าซีไอดี ได้ 20 - 40 % และสามารถย่อยสลายได้มากกว่า 50% ยกเว้น Ethylene glycol ซึ่งสลายได้เพียง 10 - 30%

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่า กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้ามีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน โดยในปัจจุบันกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียและสามารถกำจัดอนุภาคความขุ่น อนุภาคน้ำมัน สี และซีไอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเป็น

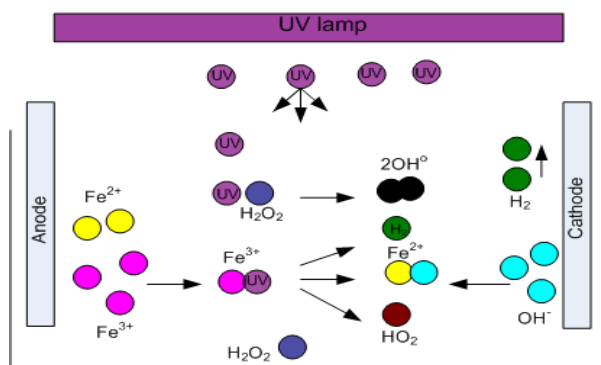
กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ในขณะที่ขั้วลบ (ขั้วแคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างเนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำและทำให้เกิดการตกตะกอนของ เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe^{3+}) ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_2$ และ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$ (ดังภาพที่ 2.14) กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าสามารถสร้างและดูแลระบบได้ง่าย เสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ เนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมีในการบำบัด ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดจะไม่มีสารเคมีปนเปื้อน นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีขุ่น แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด เนื่องจากน้ำมันตัดเป็นน้ำมันที่มีความคงตัวและค่าซีไอดีที่สูงถึงแม้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนั้นยังไม่ผ่านมาตรฐาน (Bensadok และคณะ, 2007)



ภาพที่ 2.14 กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ส่วนกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันขั้นสูง เป็นกระบวนการที่ผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะไปทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย การผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล มีหลากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการเฟนตัน กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน เป็นต้น โดยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน ประกอบด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยที่ตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เป็นตัวช่วยในการตกตะกอนในการทำให้

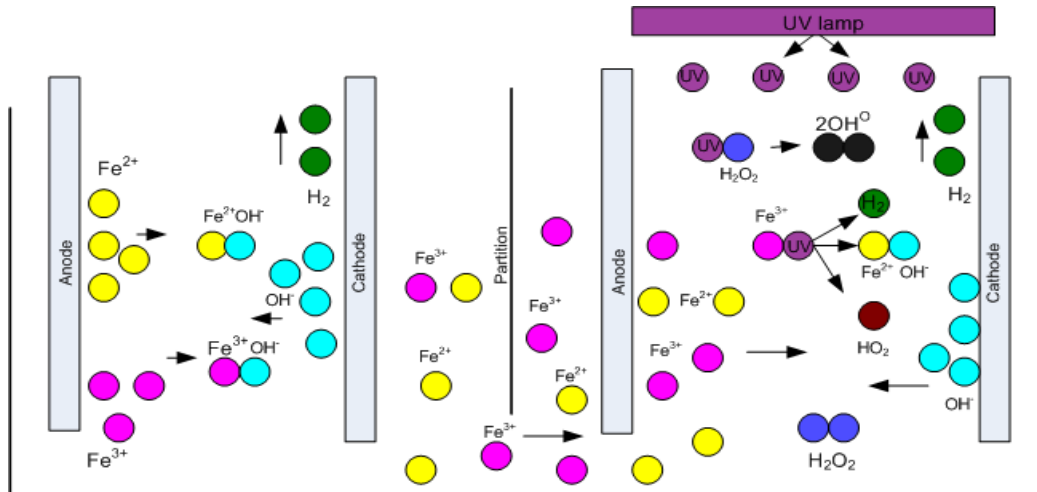
สารอินทรีย์ในน้ำเสียตกตะกอน ส่วนกระบวนการเฟนตัน คือกระบวนการที่ใช้ OH^\cdot (Hydroxyl radical) เป็นตัวออกซิเดชัน ในกระบวนการเฟนตันจะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แตกออกกลายเป็น OH^\cdot โดยใช้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้ได้ไฮดรอกซิลแรดิคัล และมีเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ส่วนตัวที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลอีกหนึ่งตัวที่สำคัญ คือ แสง UV โดยแสง UV เมื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ถึง 2 เท่า (ดังภาพที่ 2.15) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น แต่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดยังไม่ผ่านมาตรฐาน



ภาพที่ 2.15 กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ร่วมกับกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน สำหรับบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด เนื่องจากทั้ง 2 กระบวนการเป็นกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ซึ่งใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในการผลิตเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ทำปฏิกิริยาในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เมื่อทำปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วเฟอร์รัสไอออนที่เหลือน่าจะเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปใช้ต่อในกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันได้ ซึ่งจะช่วยในการลดปริมาณการใช้สารเคมีและลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด (ดังภาพที่ 2.16) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันร่วมกันทั้งระบบแบบที่ละเท (Batch system) โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว ปริมาณการเติมสารเคมี ระยะเวลาในการกักเก็บและอัตราการไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม

เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และได้น้ำทิ้งที่ผ่านมาตรฐานตามที่กำหนด



กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

ภาพที่ 2.16 กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า	ร้านอาหาร	เวลาการกักเก็บ ค่าน้ำไฟฟ้า น้ำมัน และไขมัน ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าพีเอชเริ่มต้น	น้ำมันและไขมันมากกว่า 94%	Chen และYue (2000)
	โรงงานยาสูบ	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาการกักเก็บ สารแขวนลอย ซีโอดี และ บีโอดี	สารแขวนลอย 80.59% ซีโอดี 71.01% บีโอดี 89.62%	Bejankiwar (2002)
	โรงงานฟอกย้อม	ชนิดขั้วไฟฟ้า ความขุ่น ซีโอดี ค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาการกักเก็บ	ขั้วอะลูมิเนียม -ซีโอดี 65% -ความขุ่น 98% ขั้วเหล็ก -ซีโอดี 77% -ความขุ่น 98%	Koby และคณะ (2003)

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
	โรงไม้แป่ง	ซีโอดี สี ของแข็งแขวนลอย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอช เวลาในการกักเก็บ และ ชนิดขั้วไฟฟ้า	ขั้วอะลูมิเนียม -ซีโอดี 52% ขั้วเหล็ก -ซีโอดี 42%	Inan และคณะ (2004)
	โรงอาหาร	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการกักเก็บ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้น ซีโอดี ไนมันและน้ำมันและ ระยะห่างระหว่างขั้ว	ซีโอดี 75% ไนมันและน้ำมัน 95%	Xinhua และXiangfeng (2004)

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
	อุตสาหกรรมนม	ค่าพีเอชเริ่มต้น ปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา	ซีโอดี 98% ปริมาณไขมันและน้ำมัน 99%	Ayhan และMahmut (2006)
	น้ำมันปาล์ม	ค่าพีเอชเริ่มต้น, ปริมาณน้ำมันและไขมัน, ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา	ชีวอะลูมิเนียม ซีโอดี 76% ชีวเหล็ก ซีโอดี 86%	Tezcan และคณะ (2006)
	โรงงานตัดกิ่งโลหะ	ชนิดชีวไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการทำปฏิกิริยา	ชีวอะลูมิเนียม -ซีโอดี 93% -ทีโอซี 83% -ความขุ่น 99.8%	Kobyasและคณะ(2007)

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
	น้ำมันปาล์ม	ชนิดขั้วไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการกักเก็บ ซีโอดี ระยะห่างระหว่างขั้ว และ ความขุ่น	ขั้วอะลูมิเนียม -ซีโอดี 60-70 % ขั้วเหล็ก ซีโอดี 50-60% ขั้วแกรไฟต์ ซีโอดี 20-40 %	สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ (2552)
	ไบโอดีเซล	ชนิดขั้วไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการกักเก็บ ซีโอดี ระยะห่างระหว่างขั้วและ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน	อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ ซีโอดี 55.68%, ค่าของแข็งละลายน้ำ 97.50%, ปริมาณน้ำมันและไขมัน 97.83%	อัญชลี ศรีรังสรรค์ (2551)

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
กระบวนการเฟนตัน	โรงงานฟอกย้อม	ความขุ่น ซีไอดี สี ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และปริมาณสารแขวนลอย	เฟนตัน -ซีไอดี 67.1% Ion Exchange -ซีไอดี 93%	Sheng และ Ming (1997)
	น้ำมันตัด	ความเข้มของคลื่นความถี่เหนือ เสียง (ultrasonic intensity) คุณสมบัติของปฏิกิริยาและ ความเข้มข้นน้ำมัน	ซีไอดี 92.3%	ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ (2552)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน	น้ำชะขยะ	เวลาในการกักเก็บ ระยะห่างของ ขั้วไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้า อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+})	ซีไอดี 79.4%	Zhang และคณะ (2006)

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
	น้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบ	ค่าพีเอชเริ่มต้น สี แอมโมเนียม-ไนโตรเจน ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ซีโอดี 72% สี 90%, แอมโมเนียม-ไนโตรเจน 26% ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 87%	Atmaca (2009)
	อุตสาหกรรมสิ่งทอ	การเดินระบบแบบที่ละเทและระบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลวนของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ระบบแบบที่ละเท ที่เวลา 45 นาที ปริมาณน้ำมันและไขมัน 93.9% -ซีโอดี 89.2% -บีโอดี 88.9% ระบบต่อเนื่อง ที่เวลา 60 นาที -น้ำมันและไขมัน 92.5% -ซีโอดี 79.6% -บีโอดี 69.8%	มารุต ไปราถานนท์ (2547)

ตารางที่ 2.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	แหล่งที่มา
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน	โรงงานฟอกย้อม	ซีโอดี สี และการใช้ $H_2O_2/UV/Fe^{2+}$ และ H_2O_2/Fe^{2+}	$H_2O_2/UV/Fe^{2+}$ -ซีโอดี 80% -สี 90% H_2O_2/Fe^{2+} -สีและซีโอดี 80% H_2O_2/UV^+ สีและซีโอดี 10%	Shyn และคณะ(2000)
	น้ำมันหล่อลื่น	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสง UV ค่าพีเอชเริ่มต้น การเติม เพอร์ริกอิออน (Fe^{3+}) และ ซีโอดี	ซีโอดี 20-40 % Ethylene glycol 10-30 %	Philippopous และ คณะ(2003)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง การวิจัยนี้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดแผนการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ขอบเขตของการวิจัย และดำเนินการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 6 ส่วนย่อย

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

ส่วนที่ 2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process) โดยใช้วิธีจาร์เทสต์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย รวมถึงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

ส่วนที่ 3 ศึกษาการใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้าและพีเอช โดยเดินระบบแบบทีละเท

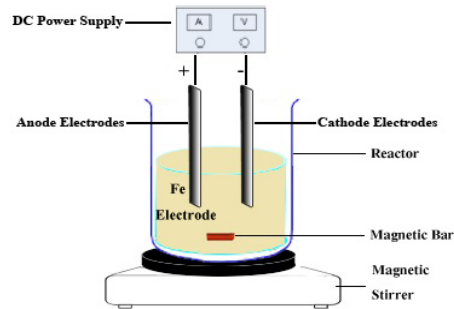
ส่วนที่ 4 ศึกษาการใช้กระบวนการเฟนตันและอิเล็กโทรเฟนตัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($Fe^{2+} : H_2O_2$) และการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสีย โดยเดินระบบแบบทีละเท

ส่วนที่ 5 ศึกษาการใช้กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน โดยประยุกต์ใช้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากการทดลองกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยเดินระบบแบบทีละเท

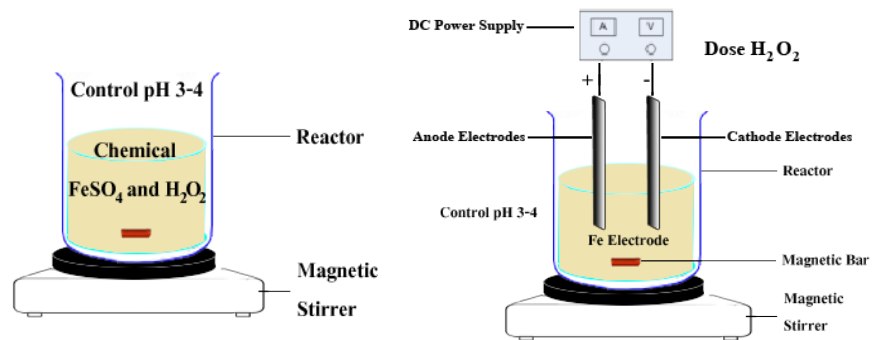
ส่วนที่ 6 ศึกษาการใช้กระบวนการผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น จากนั้น ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากอัตราการไหลน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม รวมถึงรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบและเดินระบบที่เหมาะสม

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

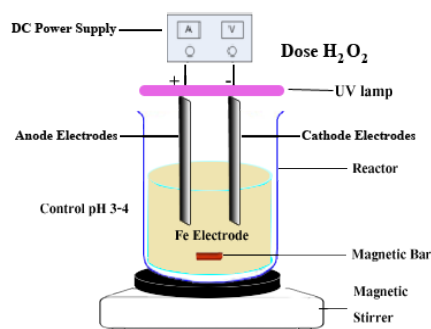
3.2.1 การจัดอุปกรณ์สำหรับทดลอง



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน



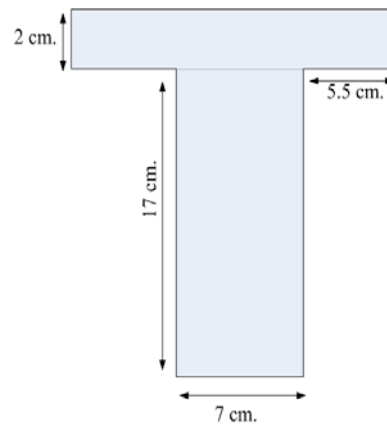
ภาพที่ 3.2 แผนผังการต่อชุดอุปกรณ์เฟนตันและอิเล็กโทรเฟนตัน



ภาพที่ 3.3 แผนผังการต่อชุดอุปกรณ์โฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน



ภาพที่ 3.4 แผนผังการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรโคแอกกูเลชันและอิเล็กโทรเฟนตัน



ภาพที่ 3.5 ลักษณะขั้วไฟฟ้า

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน เฟนตัน อิเล็กโทรเฟนตัน ไฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน กระจกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 3.1 – 3.3)
2. ชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรโคแอกกูเลชันและอิเล็กโทรเฟนตัน กระจกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 3.4)
3. หลอด UV (Ultraviolet-A lamps) เป็นหลอดยูวีเอ ยี่ห้อ PHL รุ่น TL15W/09CLEO ความยาวคลื่น 256 นาโนเมตร
4. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากเหล็กมีลักษณะเป็นรูปตัว T (ดังภาพที่ 3.5)

5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรงให้ความต่างศักย์สูงสุด 60 โวลต์
6. เครื่องปั่นกวนน้ำ (Motor stirrer) บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น IKA LABORTECHIK
7. Peristaltic pump บริษัท WATSON MARLOW 505S ความต่างศักย์ 100-240 โวลต์ 50/60 เฮิร์ตซ์
8. กล้องจุลทรรศน์ บริษัท Nikon รุ่น YS2-H
9. เครื่องวิเคราะห์ความขุ่น Loviond รุ่น TurbiCheck
10. เครื่องวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า รุ่น model con 900
11. นาฬิกาจับเวลา บริษัท KADIO รุ่น KD-2015
12. เครื่องวัดค่าพีเอช บริษัท Scientific Promotion รุ่น CG840
13. เครื่อง UV/VIS spectrophotometer
14. ชุดทดสอบจาร์เทสต์
15. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี
 - หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 16x150 มม. พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)
 - ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memment รุ่น 600 สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 150 ± 2 °C
 - ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
 - กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
 - ปิเปต (Pipet) ขนาด 1 5 10 และ 25 มิลลิลิตร

3.2.3 สารเคมี

1. น้ำมันตัด บริษัท Castrol cooledge BI
2. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion บริษัท Carlo Erba
3. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulphate บริษัท Carlo Erba
4. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4) บริษัท J.T. Baker
5. กรดอะซิติก glacial acetic, CH_3COOH) บริษัท Qrec
6. เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, $FeCl_3$) บริษัท Carlo Erba

7. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodine ,KI) บริษัท Carlo Erba
8. สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator) บริษัท Carlo Erba
9. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) บริษัท Qrec
10. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต
11. สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$)
12. สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)
13. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
14. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต $Na_2S_2O_3$
15. สารละลายโซเดียมออกซาเลต (NaC_2O_4)
16. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
17. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.H_2O$)
18. สารละลายฟีนานโทโรลีน 1,10-phenanthroline ($C_{12}H_8N_2.H_2O$)
19. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ ละลาย $NH_4C_2H_3O_2$

โดยที่ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด (cutting oil); Castrol Cooledge BI ที่ใช้ในงานวิจัย แสดง (ดังตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด

ชื่อทางเคมี: น้ำมันแร่, สารเพิ่มคุณภาพและสารอิมัลซิฟายเออร์

ส่วนประกอบ: น้ำมันแร่, สารเพิ่มคุณภาพ และสารอิมัลซิฟายเออร์

ค่าความหนืด (CP) @ 20 °C	0.935
พีเอชของสารละลาย @ 5°C	10
Specific Gravity (g/cm^3) @ 15°C	0.950
Kinematic Viscosity (St) @ 40 °C	38.45
Flash Point (PMCC), °C	70
Pour Point, °C	-12

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการทำวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน

การทดลองที่ 3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียจากน้ำมันตัด

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง เตรียมโดยใช้น้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ซีไอดี \approx 250 - 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำการปั่นกวนน้ำตัวอย่างที่ 125 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที (ธนนท์ เจลิมสินสุวรรณ, 2552) เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลอง

การทดลองที่ 3.3.2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสม ในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย

การทดลองที่ 3.3.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเดินระบบแบบที่ละเท

การทดลองที่ 3.3.4 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมี ค่าพีเอช ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมและค่าอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเดินระบบแบบที่ละเท

การทดลองที่ 3.3.5 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน โดยประยุกต์ใช้สภาพการทำงานที่เหมาะสมจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบที่ละเท

การทดลองที่ 3.3.6 ศึกษากระบวนการผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่องและประยุกต์ใช้สภาพการเดินระบบที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้นเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากอัตราการไหลน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม รวมถึงรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 3.2 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

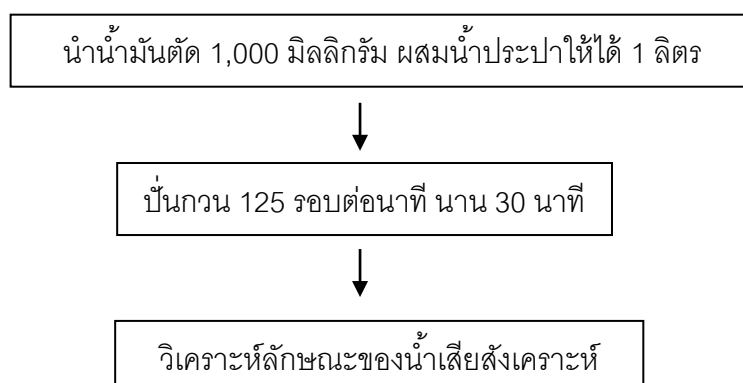
ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
ค่าซีโอดี	Dichromate Close Reflux Method (AWWA.)
ปริมาณของน้ำมัน	การสกัดด้วยกรวยแยก (มันลิน, 2540)
ความขุ่น (Turbidity)	เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)
ขนาดหยดน้ำมัน (oil droplet)	กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
ค่าพีเอช	เครื่องวัด pH-meter
ปริมาณ Fe^{2+}	Phenanthroline method (AWWA.)
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	Iodometric Method (AWWA.)
ค่าของแข็งละลายในน้ำ	Conductivity and Total dissolve solid meter
ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter

3.3.1. ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสีย

การทดลองที่ 3.3.1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา แสดงดังตาราง 3.3 และภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง	1. 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดอนุภาคน้ำมัน 2. คุณภาพน้ำทิ้ง	1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.1. ค่าซีไอดี 2.2. ค่าความขุ่น 2.3. ค่าพีเอช 2.4. ปริมาณไขมันและน้ำมัน 2.5. ค่าของแข็งละลายในน้ำ



ภาพที่ 3.6 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

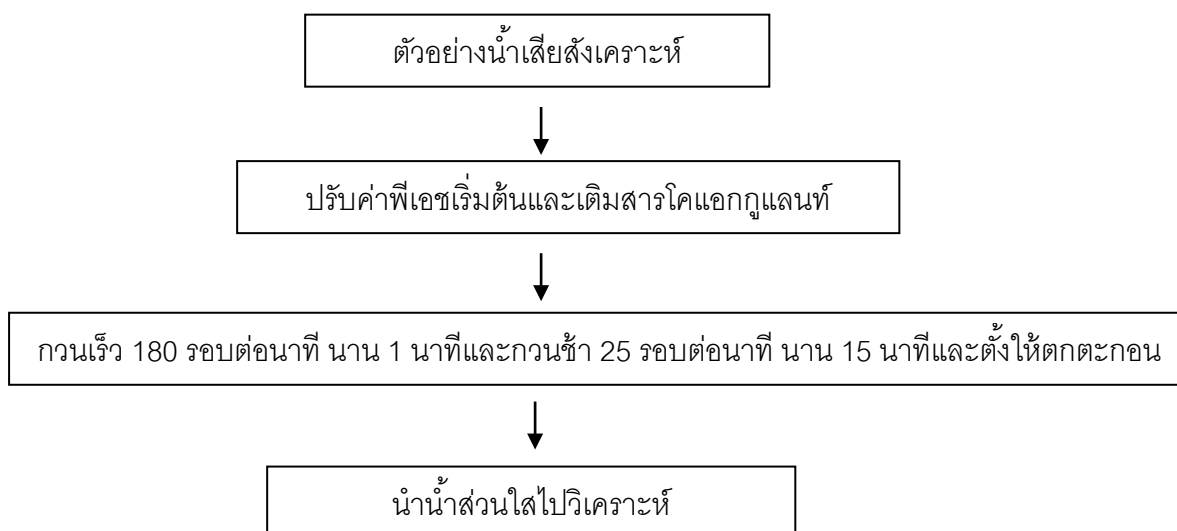
3.3.2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพโดยวิธี จาร์เจสต์

การทดลองที่ 3.3.2 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม นำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นด้วยกรด (H_2SO_4) เท่ากับ 3 4 5 6 7 8 9 11 และ 12 โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เจสต์ ใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 40 60 70 80 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนเร็ว 180 รอบต่อนาที

นาน 1 นาทีและกวนช้า 25 รอบต่อนาที นาน 15 นาทีและตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำเสียส่วนใสไปวิเคราะห์ โดยตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังตารางที่ 3.4 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.6

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธี Coagulation - Flocculation

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง	1. 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าพีเอช 2. ชนิดโคแอกกูแลนต์ 3. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์	1. 3 - 12 2. เฟอริกคลอไรด์ (FeCl ₃) 3. 40 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีโอดี 1.2 ค่าความขุ่น 1.3 ค่าพีเอช



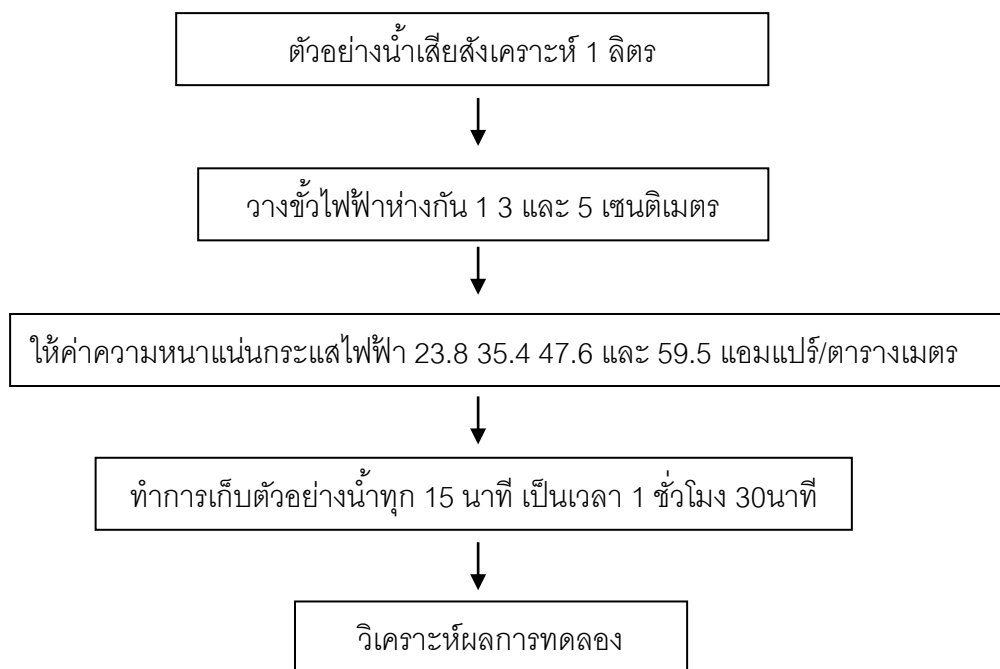
ภาพที่ 3.7 แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ

3.3.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

การทดลองที่ 3.3.3 ศึกษาระยะเวลาห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมทำการการศึกษาเพื่อหา ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการทางไฟฟ้า โดยทำการศึกษาที่ระยะห่าง 1 3 และ 5 เซนติเมตร ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 23.8 35.4 47.6 และ 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังตารางที่ 3.5 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.8

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ความเร็วรอบในการปั่นกววนตัวอย่าง	1. 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 125 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	1. 23.8 35.4 47.6 และ 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 2. 1 3 และ 5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1. ค่าซีไอดี 1.2. ค่าความขุ่น 1.3. ค่าพีเอช 1.4. ค่าการนำไฟฟ้า 1.5. ค่าของแข็งละลายน้ำ 1.6. ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+})



ภาพที่ 3.8 แผนผังการหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

3.3.4 ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยแอดวานซ์ออกซิเดชัน

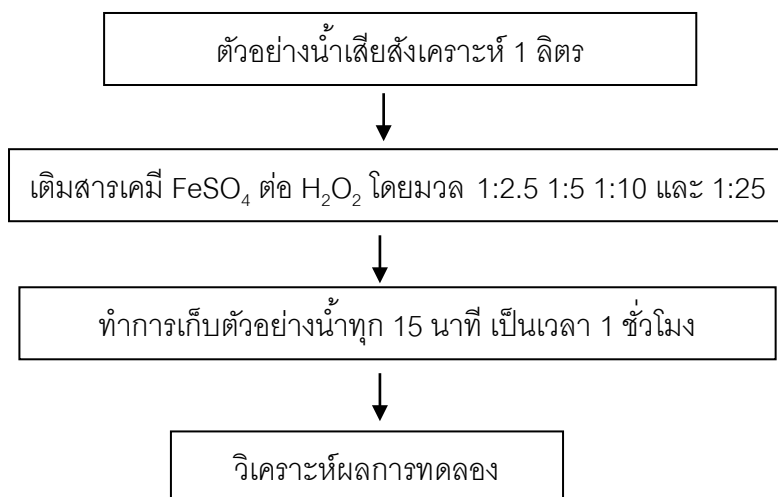
การทดลองที่ 3.3.4.1 ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย

กระบวนการเฟนตัน

3.3.4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วน 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 โดยมวล (โดยทำการเติมเฟอร์รัส 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามอัตราส่วน ทำการปั่นกวนตัวอย่างตลอดเวลาและควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 3 - 4 ตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังตารางที่ 3.6 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.9

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย	1. 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 3 - 4
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณ FeSO_4 ต่อ H_2O_2 โดยมวล	1. 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1. ค่าซีไอดี 1.2. ค่าความขุ่น 1.3. ค่าพีเอช 1.4. ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) 1.5. ค่าการนำไฟฟ้า 1.6. ค่าของแข็งละลายน้ำ



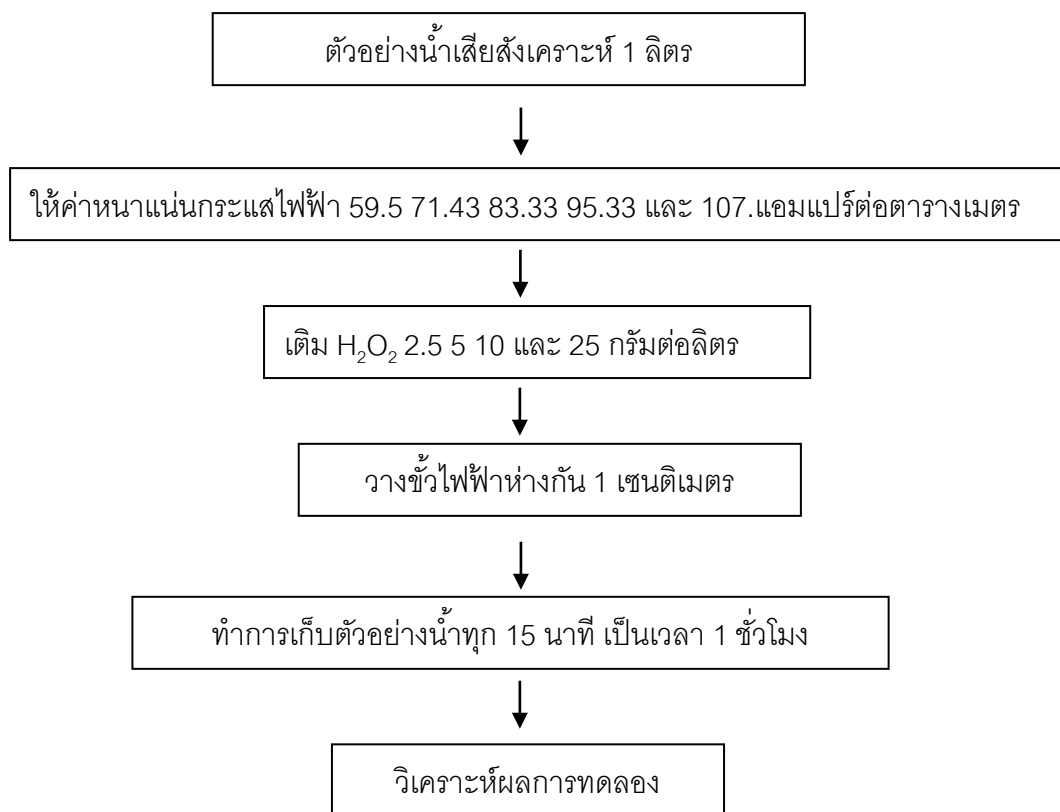
ภาพที่ 3.9 แผนผังการสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

การทดลองที่ 3.3.4.2 ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

3.3.4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด ทำการศึกษาเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าและปริมาณสารเคมีที่ของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยทำการศึกษาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 71.43 83.33 95.33 และ 107.1 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม ที่ 2.5 5 10 25 กรัมต่อลิตร ทำการปั่นกวนตัวอย่างตลอดเวลาและทำการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 3 - 4 ตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังตารางที่ 3.7 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.10

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย	1. 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 3 - 4
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณ H_2O_2 2. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1. 2.5 5 10 และ 25 กรัมต่อลิตร 2 59.5 71.43 83.33 95.33 และ 107 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีไอดี 1.2 ค่าความขุ่น 1.3 ค่าพีเอช 1.4 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) 1.5 ค่าการนำไฟฟ้า 1.6 ค่าของแข็งละลายน้ำ



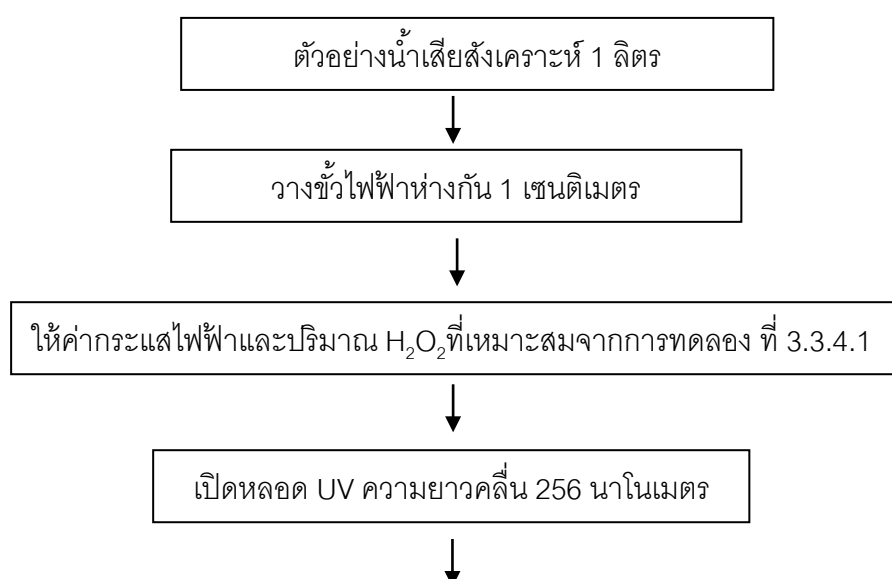
ภาพที่ 3.10 แผนผังการสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด
ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

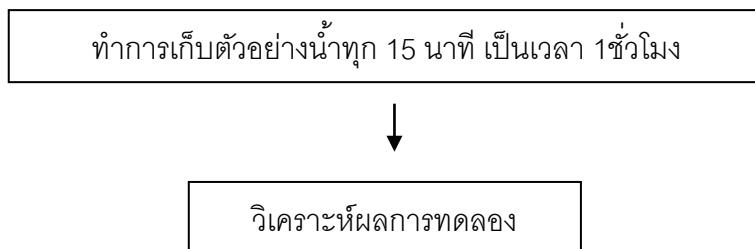
การทดลองที่ 3.3.4.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการทาง
โฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

3.3.4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดย
กระบวนการทางโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันทำการศึกษาเพื่อหาค่าหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณ
สารเคมีของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมมีผลต่อประสิทธิภาพ
ในการบำบัด โดยทำการศึกษาที่ค่ากระแสไฟฟ้าและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม
จากการทดลองข้างต้น ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร และปริมาณรังสี UV 256 นาโนเมตร
ตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังตารางที่ 3.8 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.11

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรลิซิส

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ปริมาณรังสี UV 4. ระยะห่างระหว่างขั้ว 5. ค่าพีเอชของน้ำเสีย	1. 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 256 นาโนเมตร 4. 1 เซนติเมตร 5. 3 - 4
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2. ปริมาณ H ₂ O ₂	1. จากการทดลองที่ 3.3.4.1 2. จากการทดลองที่ 3.3.4.1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีไอดี 1.2 ค่าความขุ่น 1.3 ค่าพีเอช 1.4 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe ²⁺) 1.5 ค่าการนำไฟฟ้า 1.6 ค่าของแข็งละลายน้ำ





ภาพที่ 3.11 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด
โดยกระบวนการฟิโตอิเล็กโทรเฟนตัน

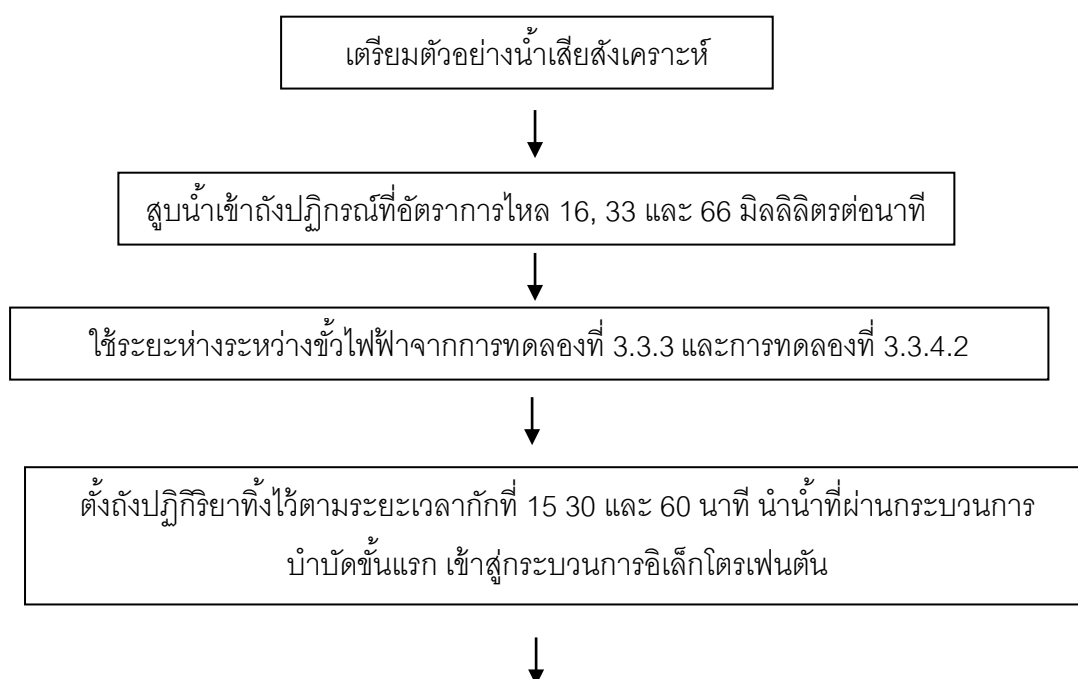
3.3.5 การปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

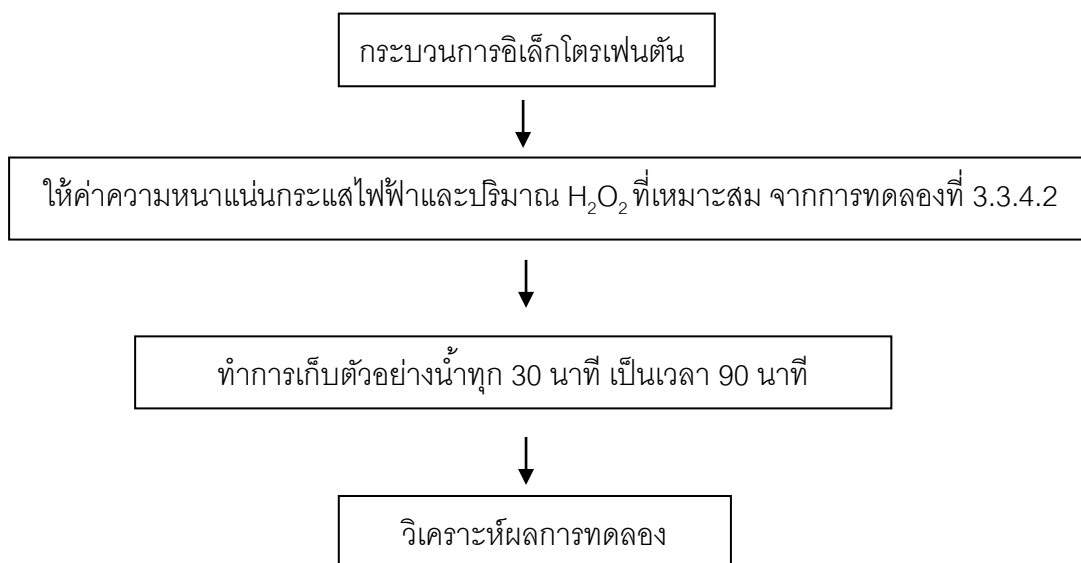
การทดลองแบบผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 3.3.5 ศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม นำน้ำเสียส่งเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดเข้าถังปฏิกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ส่วนที่ 2 เป็น กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.3.3 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมและปริมาณ FeSO_4 ต่อ H_2O_2 ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.4.2 มาประยุกต์ใช้ในการทดลองแบบผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง และศึกษาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบ 90 นาที รวมทั้งวัดค่าซีไอดี ความหนาของชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้น ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.9 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.12

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียโดยกระบวนการผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3. ค่าหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4. ปริมาณ H_2O_2	1. 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. จากการทดลองที่ 3.3.3 3. จากการทดลองที่ 3.3.3 และ 3.3.4.2 4. จากการทดลองที่ 3.3.4.2
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	1. 16 33 และ 66 มิลลิลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีโอดี 1.2 ค่าความขุ่น 1.3 ค่าพีเอช 1.4 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) 1.5 ค่าของแข็งละลายในน้ำ 1.6 ค่าการนำไฟฟ้า 1.7 ปริมาณไขมันและน้ำมัน





ภาพที่ 3.12 แผนผังศึกษาการการทดลองแบบผสมผสานโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

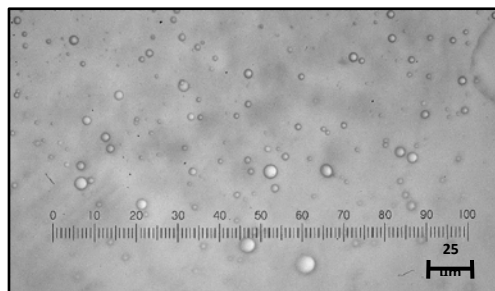
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดอนุภาคของน้ำมันตัดที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (เฟนตัน อิเล็กโทรเฟนตันและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน) ในถึงปฏิกิริยาแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า จากนั้นทำการศึกษาระบบการแอดวานซ์ออกซิเดชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด ซึ่งอาศัยกลไกการออกซิไดซ์กับอนุภาคของน้ำมันโดยไฮดรอกซิลเรดิเคิลในการกำจัดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย และนำสภาวะที่เหมาะสมทั้ง 2 กระบวนการมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเดินระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวม

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียจากน้ำมันตัดก่อนการบำบัด

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดค่าความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองสามารถวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดได้ดังตาราง 4.1 โดยพบว่าเมื่อผสมน้ำมันตัดกับน้ำประปาจะเกิดเป็นอิมัลชันของน้ำมันตัดที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) ส่งผลให้ยากต่อการบำบัดโดยกระบวนการแยกทางกายภาพทั่วไป เนื่องจากน้ำมันตัดมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ดังภาพที่ 4.1 ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งยากต่อการแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันซึ่งสามารถกำจัดอนุภาคแขวนลอยต่างๆในน้ำเสียโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการออกซิไดซ์กับอนุภาคน้ำมันที่แขวนลอยในน้ำเสียได้ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียดังเคราะห์เริ่มต้น

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียดังเคราะห์ก่อนการบำบัด

สมบัติ	ค่าความเข้มข้น น้ำมันตัด 1 (กรัม/ลิตร.)	ค่าความเข้มข้น น้ำมันตัด 0.1 (กรัม/ลิตร.)	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง*
ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร.)	$3,250 \pm 250$	200 ± 80	≤ 120
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร.) จากการ แปลงค่าการนำไฟฟ้า	183 ± 20	180 ± 20	$\leq 3,000$
ความขุ่น (เอ็นทียู)	$1,200 \pm 135$	170 ± 20	ไม่ได้กำหนด
พีเอช	8.02 ± 0.2	7.14 ± 0.2	5.5 – 9.0
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	275 ± 50	286 ± 50	ไม่ได้กำหนด
ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร.)	0.26	0.30	ไม่ได้กำหนด
อนุภาคน้ำมัน(ไมครอน)	1.52	1.52	ไม่ได้กำหนด
ซีตาโพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)	-52	-52	ไม่ได้กำหนด

*ที่มา ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539.

จากตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของน้ำเสียน้ำมันตัด เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแล้วพบว่าค่า COD เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ส่วนค่า pH ส่วนค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นค่าที่แสดงถึงความเสถียรของอนุภาคที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งในน้ำเสียที่มีน้ำมันตัดปนเปื้อนจะมีอนุภาคประจุเป็นลบ ดังนั้นเมื่อเพิ่มประจุบวกในน้ำเสีย จะทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพระหว่างอนุภาคของน้ำมัน เนื่องจากประจุบวกจะส่งผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคของน้ำมันลดลง จึงทำให้อนุภาคของน้ำมันสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยกลไกโคแอกกูเลชันเช่นกัน โดยสามารถผลิตโอโซนที่มีประจุบวกเพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคของน้ำมันที่อยู่ในน้ำเสียได้ เพื่อเป็นการกำจัดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนขึ้นต้น และช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น

4.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ Coagulation - Flocculation

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยการทำลายเสถียรภาพด้วยวิธี Coagulation – Flocculation (Jar test) เพื่อวิเคราะห์หาค่าพีเอชและปริมาณสารเคมีโคแอกกูแลนต์เพอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) ที่เหมาะสม ในการกำจัดอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสีย ประกอบด้วยสองกลไกหลักคือ ส่วนแรกจะเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยการเติมสารเคมีลงในถังกวนเร็วซึ่งจะช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีและการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมัน ส่วนที่สองจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงโดยการกวนช้า ซึ่งทำให้ตะกอนจะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยทำการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 3 - 12 และปริมาณความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ทำการศึกษาในช่วง 40 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในทางทฤษฎีค่าประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากผลของการทำลายเสถียรภาพโดยการเติมโคแอกกูแลนต์ซึ่งจะต้องอาศัยกลไก 4 แบบ (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2542) ดังนี้

- การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) เป็นการเพิ่มจำนวนโอโซนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย แต่มีข้อเสีย คือ โอโซนบวกจะอยู่ที่ชั้นกระจายเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึงไม่สามารถทำลายประจุลบของคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร

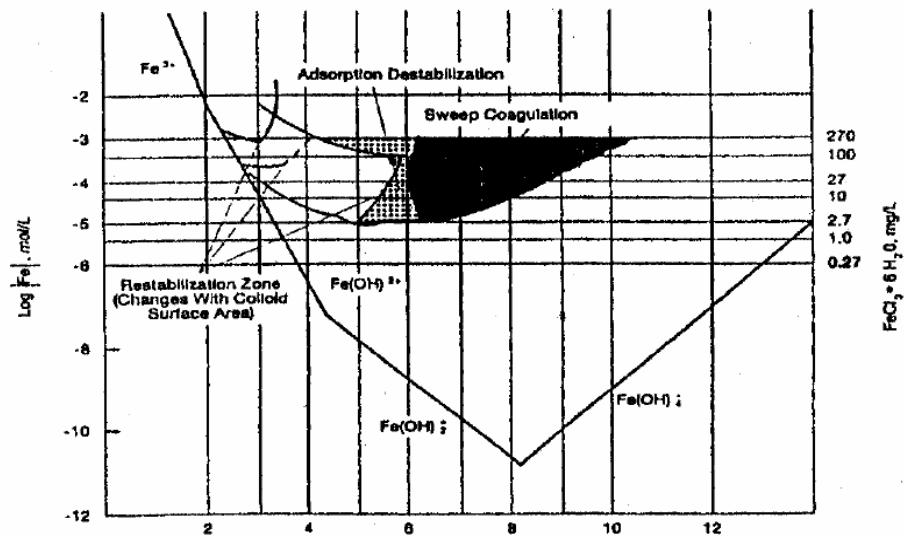
- กลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า (Charge neutralization) การดูดติดผิวจะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่กลไกนี้สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ (Charge Reversal) เมื่ออนุภาคสูญเสียเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสให้คอลลอยด์สัมผัสกัน จะทำให้สามารถรวมตัวกันได้ มีขนาดใหญ่ขึ้น และตกตะกอนในที่สุด

- การห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Flocculation) เป็นการเพิ่มขนาดหรือนำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ทำให้สูญเสียสภาพและตกตะกอนได้ โดยคอลลอยด์เป็นแกนกลางในผลึกดังกล่าว

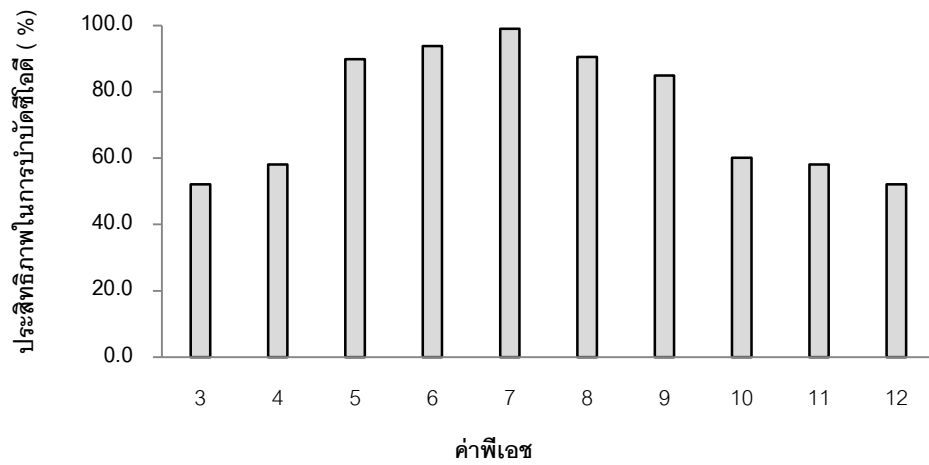
- การใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer Bridging) เนื่องจากโมเลกุลโพลีเมอร์สามารถเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งจึงอาจเกิดควมมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) ดังนั้นการเติมมากเกินไปก็ก่อให้เกิดผลเสียได้

4.2.1 การศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม

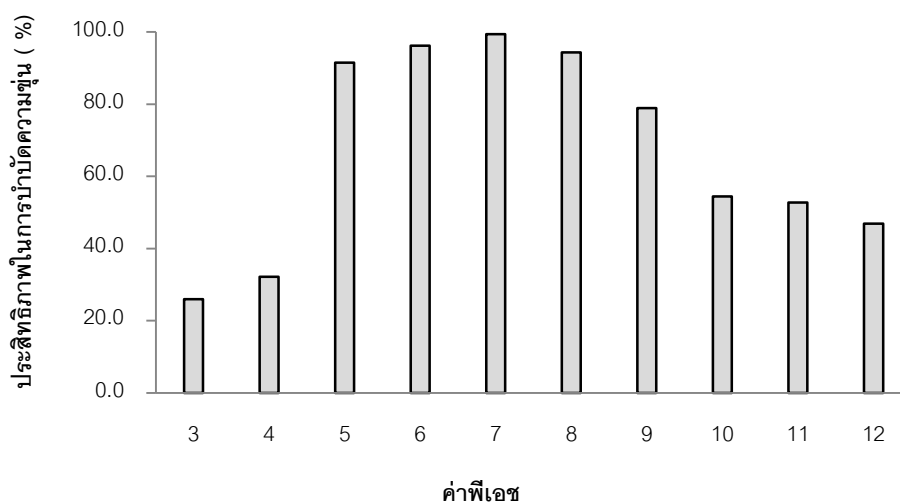
การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลกระทบบของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยเติมสารลดแรงตึงผิว (FeCl₃) ที่ค่าความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตรและทำการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่ช่วง 3 - 12 จากการทดลองพบว่าค่าซีไอดีและค่าความขุ่นจะลดลงได้ดีที่สุดในช่วงค่าพีเอชเริ่มต้น 5 - 7 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและค่าความขุ่นที่ 90% แสดงดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ดังแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากการควบคุมกลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์ ในด้านกลไกของกระบวนการ Coagulation - Flocculation และปริมาณ Fe อีออนที่ละลายในเฟสน้ำดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยสรุปประสิทธิภาพในการบำบัดอนุภาคน้ำมันตัดแขวนลอยร่วมกับเฟอริกคลอไรด์ในน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสม 5 - 7



ภาพที่ 4.2 ไดอะแกรมการควบคุมกลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย
เฟอร์ริกคลอไรด์ (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2554)



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน

4.2.2 การศึกษาการเติมปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (FeCl_3) ที่เหมาะสม

จากการศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (เฟอริกคลอไรด์) ที่พีเอช 7 จะพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณเฟอริกคลอไรด์มีผลต่อการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในกลไกการดูดติดผิว (Charge neutralization) ดังภาพที่ 4.5 และกลไกการห่อหุ้มคอลลอยด์ (sweep floc coagulation) ดังภาพที่ 4.6 จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีในช่วงแรกทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นตามกลไกการห่อหุ้มคอลลอยด์ โดยปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมมีปริมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและค่าความขุ่น 90% (สุดสิริ วิจิตรสุวัฒน์, 2552) เมื่อเติมสารเคมีในปริมาณเกินค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากถ้าใส่ปริมาณสารเคมีมากเกินไป จะเป็นการเพิ่มอิออนประจุบวกจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้อนุภาคของน้ำมันที่มีประจุลบจะสามารถเปลี่ยนเป็นประจุบวกได้ เรียกว่า Charge reversal ทำให้คอลลอยด์ประจุบวกผลักรันเอง ดังนั้นคอลลอยด์จึงกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง รวมถึงสิ้นเปลืองปริมาณเคมีในการบำบัดโดยไม่จำเป็น

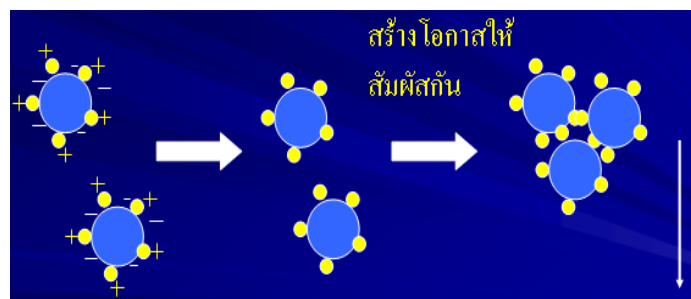
ดังนั้นจากผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าปริมาณโคแอกกูแลนต์ (FeCl_3) มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี

- ปริมาณสารเคมี (FeCl_3) ที่เหมาะสม 70 - 80 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในช่วงแรกจะเกิดกลไก การดูดติดผิว/การทำลายประจุ ทำให้อนุภาคของน้ำมันที่มีประจุลบจะ

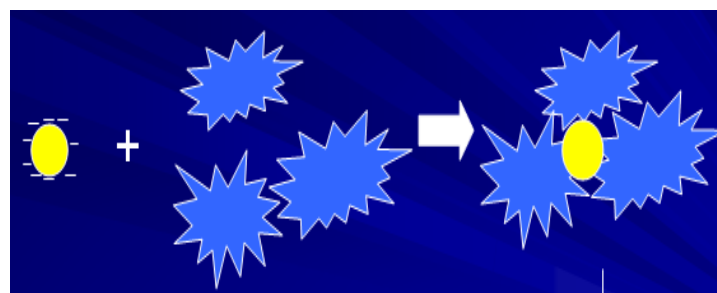
สามารถเปลี่ยนเป็นประจุบวกได้ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคของน้ำมันในข้างต้น ในช่วงต่อมาจะเกิดกลไก sweep floc coagulation ทำให้อนุภาคของน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วรวมตัวกับตะกอนฟล็อก $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้น ดังสมการ 4.1 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น เพราะอนุภาคของน้ำมันที่รวมตัวกับฟล็อก $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

- ปริมาณสารเคมีน้อยเกินไป ส่งผลให้การการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันเกิดขึ้นได้ไม่ดี ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง เนื่องจากปริมาณตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้นเกิดจะมีปริมาณน้อย ส่งผลให้การแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียเกิดได้ไม่ดี

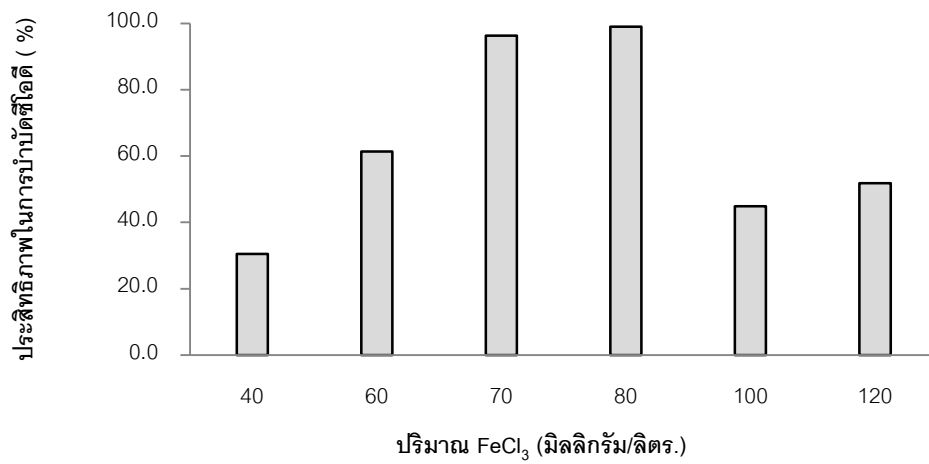
- ปริมาณสารเคมีมากเกินไปส่งผลให้เกิด Charge reversal ปริมาณมาก เนื่องจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันที่มีประจุเป็นลบ สามารถเปลี่ยนเป็นประจุบวกได้ เพราะอนุภาคของน้ำมันที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ที่บริเวณผิวสัมผัสมีประจุบวกเกิดขึ้นจำนวนมาก ทำให้อนุภาคประจุบวกเกิดการผลักกันเอง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง



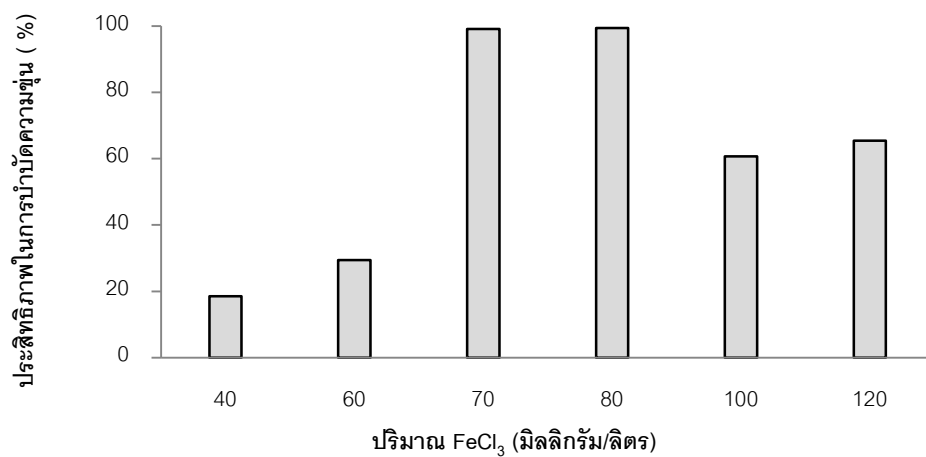
ภาพที่ 4.5 กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุบนคอลลอยด์



ภาพที่ 4.6 กลไกห่อหุ้มคอลลอยด์ด้วยผลึก (sweep floc coagulation)



ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีที่ปริมาณ FeCl₃ ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นที่ปริมาณ FeCl₃ ที่แตกต่างกัน

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า การเติมสารโคแอกกูแลนต์ (เฟอริกคลอไรด์) สามารถช่วยในการทำละลายเสถียรภาพของอนุภาคของน้ำมันได้ โดยกระบวนการ Coagulation - Flocculation ที่บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยมีสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในช่วง 5 - 7 และปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในช่วง 70 - 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัด คือ การใช้สารเคมีในการบำบัด

ส่งผลให้ต้องมีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและเมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่มีปริมาณน้ำเสียมาก ต้องมีการก่อสร้างระบบใหญ่ เนื่องจากต้องมีการบวนการในการกวนเร็ว กวนช้า เพื่อให้เกิดกระบวนการ Coagulation และ Flocculation ดังนั้นจึงได้มีการนำกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า มาประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันเช่นเดียวกับ Coagulation และ Flocculation ข้อดี คือไม่ต้องเติมสารเคมีเป็นสารโคแอกกูแลนต์ แต่อาศัยหลักการให้กระแสไฟฟ้ากับขั้วโลหะเพื่อผลิตโลหะอิออนที่เป็นประจุบวกที่ใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์และไฮดรอกไซด์อิออนกับฟองก๊าซไฮโดรเจนโดยการทำลายเสถียรภาพอนุภาคของน้ำมันและการรวมตัวของ ฟลอคกับอนุภาคของน้ำมันโดยกระบวนการ Coagulation และ flocculation ส่วนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน จะช่วยทำให้อนุภาคของน้ำมันสามารถลอยขึ้นที่ผิวน้ำได้ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของน้ำมันมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของน้ำ ซึ่งเป็นการแยกอนุภาคของน้ำมันอีกส่วนหนึ่ง

4.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเป็นการกำจัดอนุภาคของน้ำมันด้วยการประยุกต์ใช้กลไกโคแอกกูเลชัน ที่อาศัยหลักการให้กระแสไฟฟ้าไปยังขั้วโลหะ โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด คือ ที่ขั้วแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนและละลายน้ำออกมาในรูปโลหะอิออนที่เป็นประจุบวกที่ใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ส่วนที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์อิออนและเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน ดังตารางที่ 4.2 ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันโดยการแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยการรวมตัวของฟลอคกับอนุภาคของน้ำมันในรูป $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ เกิดการตกตะกอนและอนุภาคของน้ำมันบางส่วนสามารถถูกแยกออกจากน้ำเสียได้ด้วยกระบวนการ Floatation โดยฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้วแคโทด ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะการบำบัดที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 - 5 เซนติเมตรและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 23 - 60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร รวมถึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัด ปริมาณเฟอร์รัสอิออน ชนิดของตะกอน และ ค่าคงที่และอันดับในการเกิดปฏิกิริยาภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

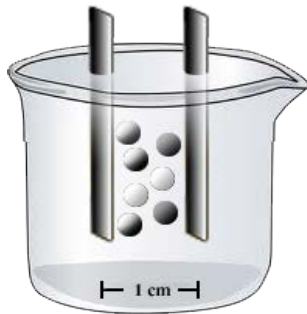
ตารางที่ 4.2 ปฏิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าเหล็ก (Koby และคณะ, 2003)

ขั้วไฟฟ้าเหล็ก	ปฏิริยาเคมีเล็กโตรีซิส
Oxidation (ขั้วแอโนด)	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (4.2)
Reduction (ขั้วแคโทด)	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (4.3)
Redox reaction	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ (4.4)

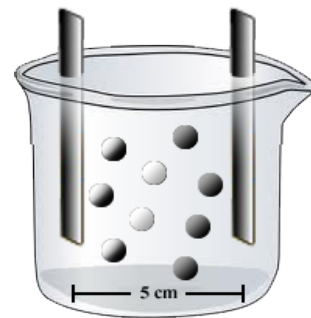
4.3.1 ศึกษาหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

จากการทดลองนี้เป็นการศึกษาหาระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสมในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ที่ใช้เหล็กเป็นขั้วเล็กโตรด โดยทำการศึกษา 3 ระยะห่าง คือ 1 3 และ 5 เซนติเมตร ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากภาพที่ 4.10 และ 4.11 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและค่าความขุ่นจะเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่ที่สภาวะการตั้งน้ำเสียทิ้งไว้ให้แยกตามเวลาโน้มถ่วง (Decantation) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาในช่วงเวลาเริ่มต้นการทดลองประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นมีอนุภาคของน้ำมันหนาแน่นในน้ำเสียปริมาณมาก ซึ่งทำให้โลหะอ็อกอนสามารถทำปฏิริยากับอนุภาคของน้ำมันได้ปริมาณมาก ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมาก ส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างอนุภาคของน้ำมันกับโลหะอ็อกอนรวมทั้งฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยดักจับอนุภาคน้ำมันให้สามารถลอยขึ้นได้อย่างรวดเร็วดังสมการที่ 4.2 – 4.3 และหลังจากเวลา 30 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเริ่มคงที่ เนื่องจากการลดลงของอนุภาคของน้ำมันในน้ำเสีย ส่งผลให้ปริมาณการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและค่าความขุ่น (Ichikawa T และคณะ, 2004) เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง เนื่องจากการวางขั้วไฟฟ้าที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมัน โดยเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างเฟอร์รัสอ็อกอนกับอนุภาคน้ำมันและฟองก๊าซ (สุตสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552) ทำให้สามารถดักจับอนุภาคของน้ำมันได้มากขึ้นดังแสดงในภาพ 4.9 แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะทำให้โอกาสในการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคของน้ำมันกับโลหะอ็อกอนลดลง รวมถึงการสร้างตะกอนที่ห่อหุ้มอนุภาคน้ำมันและ

โอกาสที่ฟองก๊าซจะชนกับอนุภาคของน้ำมันก็จะลดลงตามไปด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ดังภาพที่ 4.9

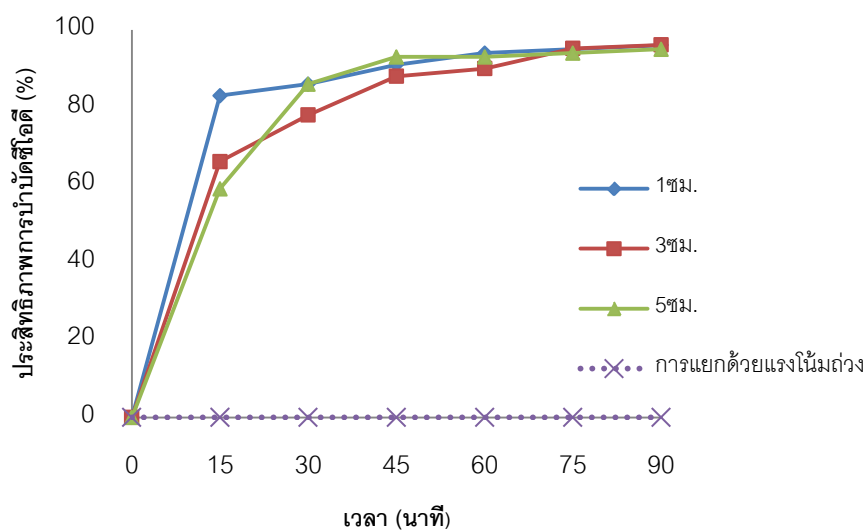


ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร.

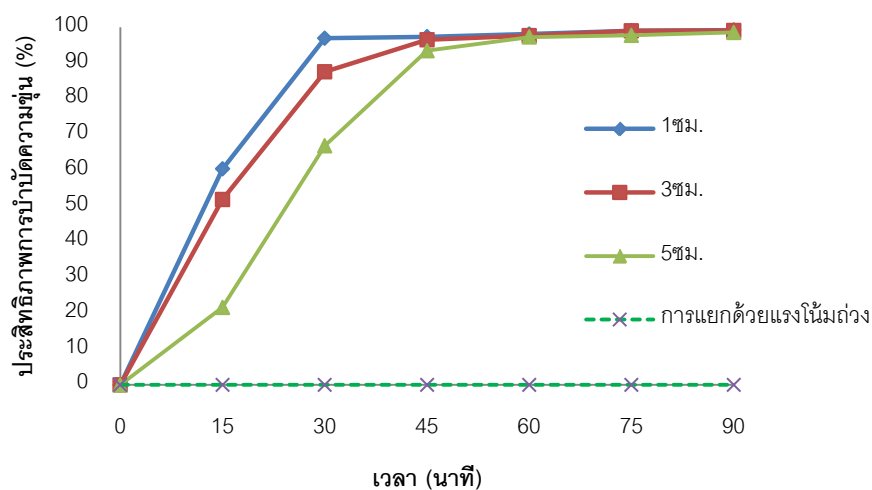


ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร.

ภาพที่ 4.9 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วที่มีต่อพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ



ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ระยะห่างระหว่างขั้วแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นที่ระยะห่างระหว่างขั้วแตกต่างกัน

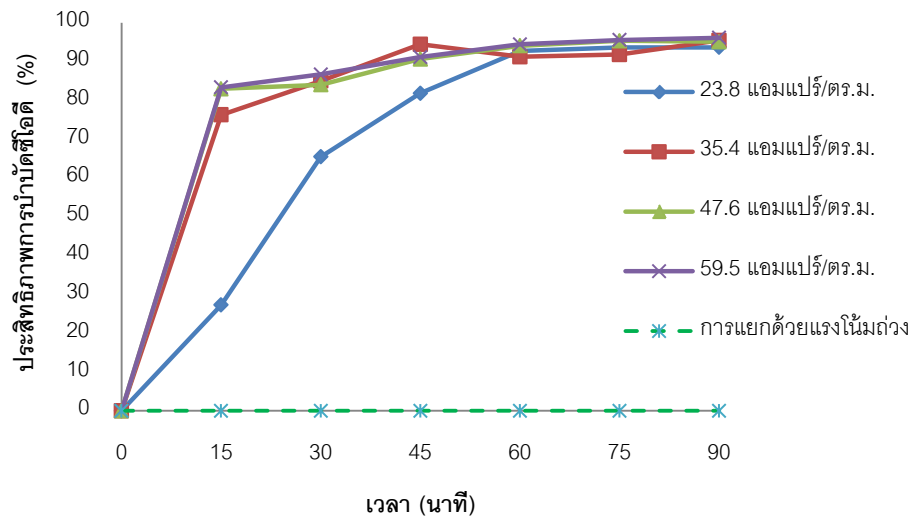
ทั้งนี้จากการทดลองศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสมที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณของฟองก๊าซและปริมาณของโลหะไอออนมีโอกาสนในการเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพื่อทำลายเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ตัวแปรอีกหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตฟองก๊าซ ปริมาณโลหะไอออนและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ออกมาจากขั้วอิเล็กโทรด คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปยังขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจะผลิตฟองก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออนในปริมาณแตกต่างกันตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

4.3.2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

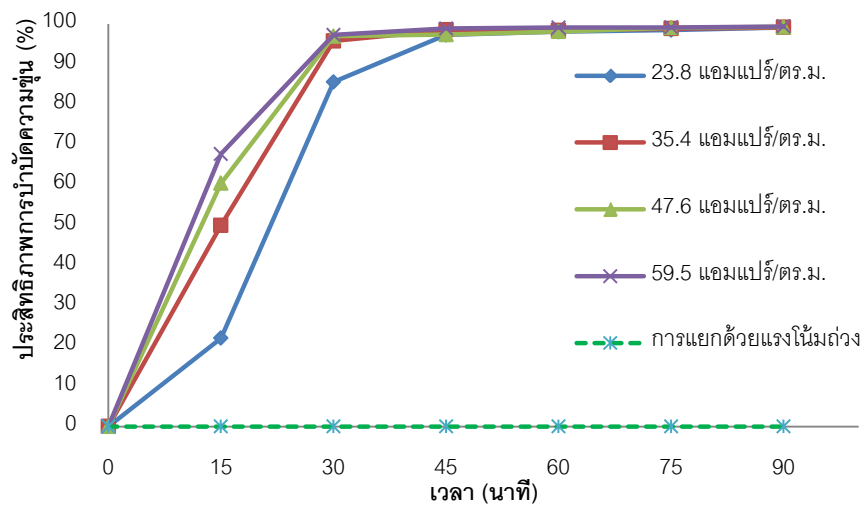
จากผลการทดลองเพื่อศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร จากการทดลองในข้างต้น พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความขุ่นและซีไอดีจะเพิ่มขึ้นตามเวลาดังภาพที่ 4.12 และ 4.13 ประสิทธิภาพในการบำบัดช่วงแรกของการทดลองจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นช้าลงและคงที่ เนื่องจากเหตุผลเดียวกับการทดลองในข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปยังขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้นจะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการกัดกร่อนสูง ทำให้โลหะไอออนที่ขั้วแอโนดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮดรอกไซด์ไอออนกับฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดจากปฏิกิริยารีดักชัน ที่ผลิต

นอกจากขั้วอิเล็กโทรดที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ (เฟอร์รัสไอออน หรือ เฟอร์ริกไอออน) มีโอกาสในการทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคของน้ำมันด้วยกลไก ทำลายประจุ / ดูดติดผิว และรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน เพื่อสร้างตะกอนฟล็อก $\text{Fe}(\text{OH})_2$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ แสดงสมการดังตาราง 4.2 ในการห่อหุ้มอนุภาคของน้ำมันเพื่อแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยกลไกแบบกวาด (sweep floc coagulation) ร่วมกับฟองก๊าซไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากขึ้น จะช่วยส่งผลให้สามารถดักจับอนุภาคของน้ำมันให้ลอยขึ้นได้มากขึ้น ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะค่อนข้างใส แสดงดังภาพที่ 4.14 โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและค่าความขุ่นสูงสุดที่ 90 และ 99% ตามลำดับที่ระยะเวลา 60 นาที อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากเกินไป (60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) พบว่าไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากประจุบวกของโลหะไอออนที่เพิ่มมากขึ้นมีปริมาณมากเกินไปจนการทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันและไฮดรอกไซด์ไอออน ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายการดำเนินระบบในด้านค่าไฟฟ้าและการจัดการปริมาณฟล็อก $\text{Fe}(\text{OH})_2$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และเกิดการปั่นป่วนในเฟสของน้ำ เพราะปริมาณฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ลอยตัวอยู่ในเฟสน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของน้ำมัน นอกจากนี้ยังอาจส่งผลทำให้อนุภาคของน้ำมันที่มีประจุลบสามารถเปลี่ยนเป็นประจุบวกได้ เรียกว่า Charge reversal ทำให้คอลลอยด์ประจุบวกผลัดกันเอง ดังนั้นคอลลอยด์จึงกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

ดังนั้นจากการศึกษาจะพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำค่าที่เหมาะสมไปออกแบบประยุกต์ใช้ในการกระบวนการต่อไป



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีดีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.14 ลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดและหลังจากผ่านการบำบัดด้วย
กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

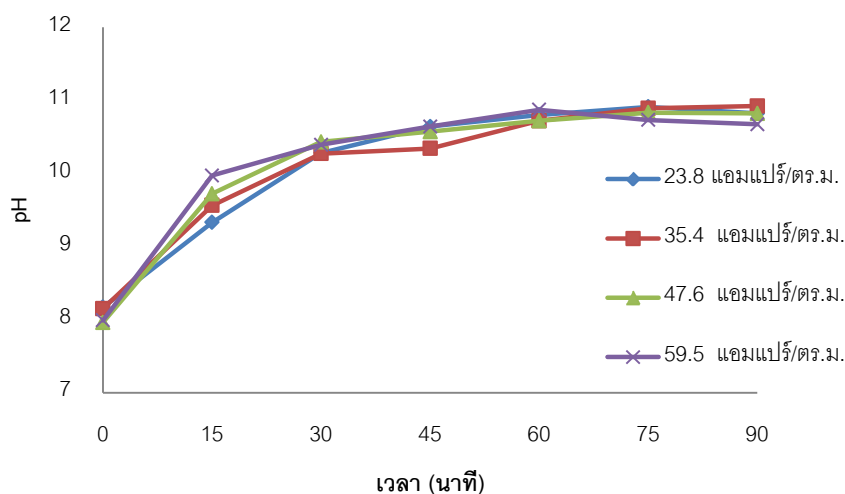
4.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

การศึกษารูปการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งทำการศึกษารูปการเปลี่ยนแปลง ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำ เนื่องจากพารามิเตอร์ที่กล่าวมาในข้างต้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด และเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัด ที่สามารถนำไปช่วยในการออกแบบระบบให้เหมาะสมต่อการบำบัด ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้มากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8 - 9 จากภาพที่ 4.15 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของพีเอชจะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช จากการทดลองพบว่า จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ช่วงเริ่มต้นการทดลอง (15 นาทีแรกการทดลอง) ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่เหลือในน้ำมีปริมาณมากเกินไปที่จะทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนเพื่อเกิดเป็นตะกอนฟล็อกเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เพราะในช่วงแรกของการทดลองเฟอร์รัสไอออน หรือ เฟอร์ริกไอออนที่ผลิตออกมาจะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนั้นจึงมีปริมาณเฟอร์รัสไอออนเหลือในการทำปฏิกิริยากับ

ไฮดรอกไซด์น้อย ทำให้มีปริมาณไฮดรอกไซด์ดรอกไซด์ที่เหลือในน้ำเสียมีปริมาณมาก ค่าพีเอชจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรกของการทดลอง ช่วงที่สองเป็นช่วงที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเริ่มคงที่ (หลังผ่านการบำบัด 15 นาที) เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันมีปริมาณลดลง ทำให้โอกาสเฟอร์รัสไอออนที่ผลิตออกมาทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันลดน้อยลง ส่งผลให้เฟอร์รัสไอออนที่ผลิตออกมาทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ปริมาณไฮดรอกไซด์ที่เหลือในน้ำเสียจึงลดลงกว่าการทดลองในช่วงแรก ดังนั้นค่าพีเอชจึงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากภาพที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากนัก เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำการศึกษามีค่าความแตกต่างไม่มาก ส่งผลให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่จากการศึกษาจะพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดมีค่าพีเอชสูงเกินมาตรฐาน ตารางที่ 4.1 ดังนั้นจึงควรทำการปรับสภาพน้ำเสียให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำภายนอก



ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

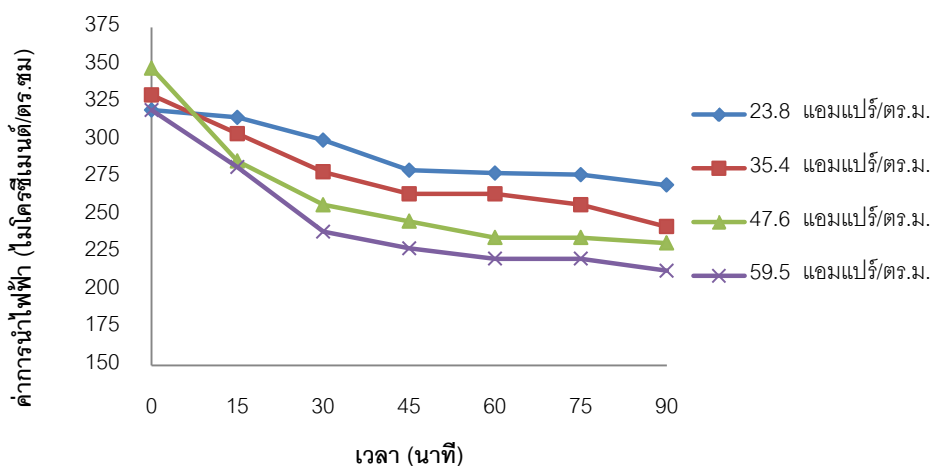
การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียก่อนผ่านการบำบัดจะอยู่ในช่วง 300 - 350 ไมโครซีเมนต์ต่อตารางเมตร จากภาพที่ 4.16 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงตามเวลา โดยเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเพิ่ม

มากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าปริมาณเพอร์ริสที่ถูกผลิตจากขั้วแอโนด จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน เพอร์ริสที่ผลิตขึ้นมาจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันและรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนฟลอคซัน ซึ่งทำให้อนุภาคของน้ำมันที่มีประจุลบเหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง ซึ่งปริมาณไอออนจะมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ถ้าปริมาณไอออนมีค่าลดลง ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงตามไปด้วย (Xinhua และ Xiangfeng, 2004) และเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าก็ลดลงตามเวลามากขึ้น เพราะอนุภาคของน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำหลังผ่านการบำบัดมีปริมาณลดลง โดยค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าความสัมพันธ์กับค่าของแข็งละลายน้ำตามสมการ 4.5

$$\text{ค่าการนำไฟฟ้า} = K (\text{ค่าของแข็งละลายน้ำ}) \quad (4.5)$$

ค่า k คือ ค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าต่อค่าของแข็งละลายน้ำ โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าของแข็งละลายน้ำและค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่า K ได้ จาก ความชันของกราฟ โดยทั่วไปค่า K จะมีค่าประมาณ 0.55 – 0.9 (Atekwana และคณะ, 2004)

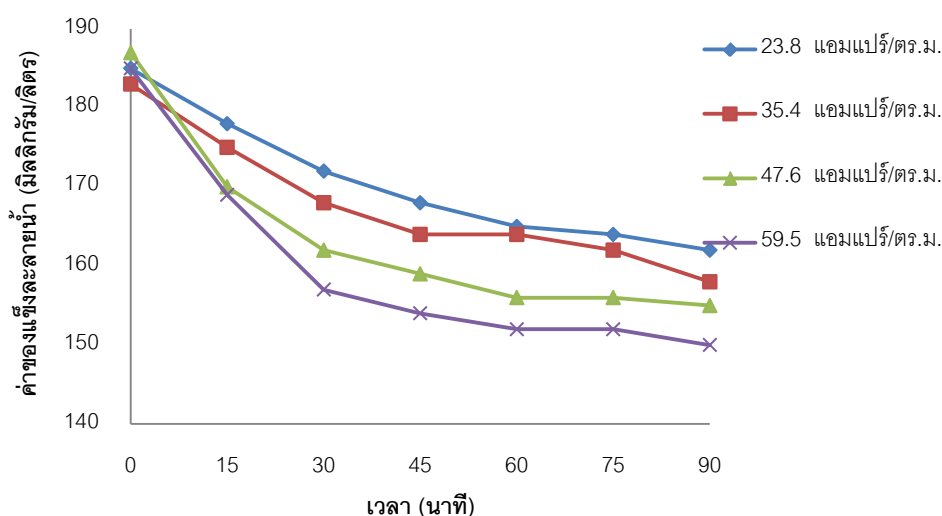


ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำตามระยะเวลาการบำบัด ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันดังภาพที่ 4.17 เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าปริมาณค่าของแข็งละลายในน้ำจะลดลงมากขึ้น โดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าของแข็งละลายน้ำจะมีปริมาณลดลงตามเวลามากที่สุด จากการทดลองค่าความ เมื่อเพิ่ม

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามกัน เพราะทำให้อนุภาคของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง เนื่องจากถูกทำลายเสถียรภาพและเกิดเป็นฟล็อกตกตะกอน ทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลงมากที่สุด ตารางที่ 4.1 โดยค่าของแข็งละลายน้ำและค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ตามกันดังสมการ 4.5 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

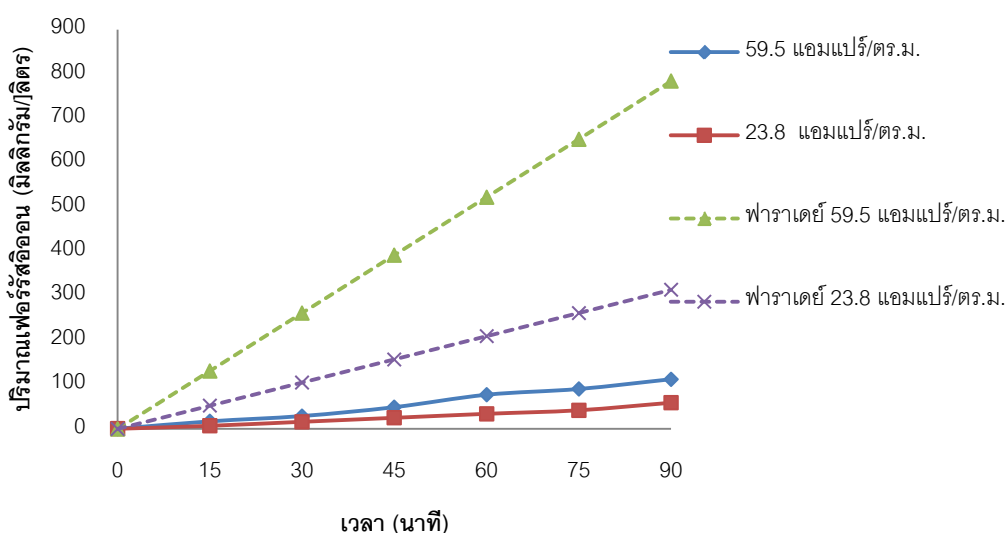
4.3.4 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณเฟอร์รัสไอออน

จากการศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าซึ่งสามารถหาได้ 2 วิธี คือ 1) วิธีทางทฤษฎีโดยการคำนวณปริมาณโลหะไอออนที่ผลิตจากขั้วแอโนดที่ละลายในน้ำจากกฎของฟาราเดย์ ดังสมการ 4.6 2) วิธีการทดลอง ซึ่งทำการวัดปริมาณเหล็กเฟอร์รัสไอออนที่ละลายในน้ำด้วยวิธีพีเพนโทรีน (APHA, 1992) จากทดลองพบว่าปริมาณของเฟอร์รัสไอออนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.18 เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่งผลให้ขั้วแอโนดจะถูกกัดกร่อนมากขึ้น ทำให้ปริมาณเฟอร์รัสที่ผลิตออกมาจากขั้วแอโนดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมีปริมาณเฟอร์รัสมากขึ้นตามสมการ 4.6 แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าปริมาณของเฟอร์รัสไอออนที่ได้จากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจากการทดลองถูกนำไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนฟล็อกเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ และบางส่วนถูกเปลี่ยนรูปจากเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เป็นเฟอริกไอออน (Fe^{3+}) เกิดเป็นตะกอนฟลอค $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จึงทำให้ปริมาณของเฟอร์รัสไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำหลังจากผ่านการบำบัดมีปริมาณน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

$$\text{กฎฟาราเดย์} = W = \frac{I \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (4.6)$$

โดยที่	W	ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)	I	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
	M	น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด	Z	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	t	เวลาที่ใช้	F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487



ภาพที่ 4.18 ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

4.3.5 ศึกษาชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียไขมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าพบว่าหลังจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีปริมาณของตะกอนเกิดขึ้นแสดงลักษณะดังภาพที่ 4.20 โดยสามารถศึกษาชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการได้จาก ภาพที่ 4.19 ซึ่งเป็นกราฟ Stability diagram ของเหล็ก (Lower, 2012 : ออนไลน์) โดยกราฟนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่า

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Eh) คำนวณได้จากสมการเนินสต์ ดังสมการ 4.7 และ 4.8 และค่าพีเอชของน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดโดยค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าพีเอช 10.8 และค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่คำนวณได้มีค่า 0.31 เมื่อลากกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานกับค่าพีเอชของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดจะได้จุดตัดภายในกราฟ stability diagram ของเหล็ก แสดงดังภาพที่ 4.19 โดยจะพบว่าจุดตัดอยู่บริเวณตะกอน Fe(OH)₃ แสดงให้เห็นว่าตะกอนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ส่วนมากเป็นตะกอนชนิด เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ Fe(OH)₃

ตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดอกซ์ที่ 298 k

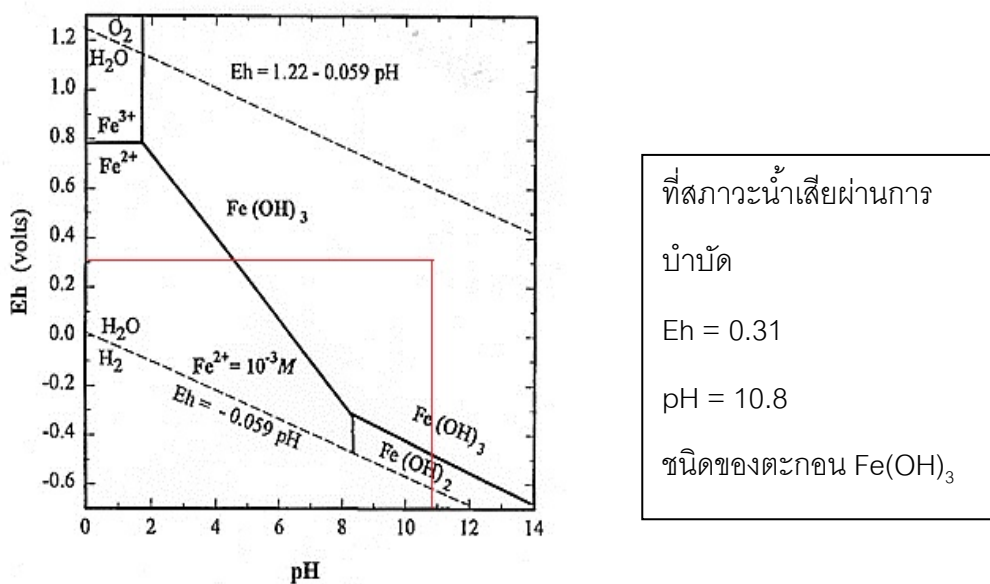
ปฏิกิริยาคึ่งรีดอกซ์	E° (v)
$2\text{H}_2\text{O}(1) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	-0.83
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0.44

$$\begin{aligned}
 E_{\text{cell}}^0 &= E^0 (\text{Cathode}) - E^0 (\text{Anode}) & (4.7) \\
 &= (-0.83) - 0.44 \\
 &= -1.31 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

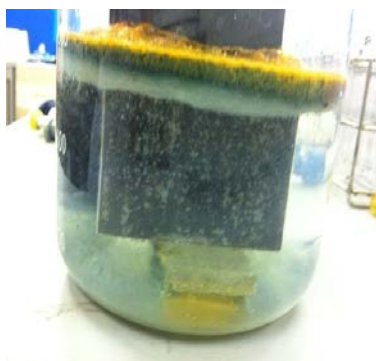
$$\text{สมการเนินสต์} \quad \text{Eh} = E_{\text{cell}}^0 + \frac{0.059}{n} \ln \frac{[\text{product}]}{[\text{reactant}]} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Eh} &= E_{\text{cell}}^0 + \frac{0.059}{n} \ln \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Fe}^{3+}]} \\
 \text{Eh} &= -1.31 + \frac{0.059}{2} \ln \frac{[4.21 \times 10^{-5}]}{[3.54 \times 10^{-28}]}
 \end{aligned}$$

$$= 0.31 \text{ volt}$$



ภาพที่ 4.19 ไดอะแกรมแสดงชนิดของเหล็กที่สภาวะต่างๆ



ภาพที่ 4.20 ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

4.3.6 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วที่มีผลต่ออันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วที่มีผลต่ออันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา โดยการหาค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาและค่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาสามารถหาได้จากวิธี differential method (ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่าอันดับการเกิดปฏิกิริยา (n) มีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าระยะห่างระหว่างขั้วที่แตกต่างกัน ซึ่งจากตารางอาจจะสรุปได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 นอกจากนี้ตาม

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (k) จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าระยะห่างระหว่างขั้ว โดยเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้ว ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ลดลง (1 เซนติเมตร) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงและมีระยะห่างระหว่างขั้วน้อย ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ผลิตออกมาจากขั้วแอโนดมีปริมาณมากและถูกจำกัดพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยๆ ค่าความหนาแน่นของประจุวามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อนุภาคของน้ำมันสามารถถูกแยกออกจากน้ำเสียได้มากขึ้น และเป็นเหตุผลหลักในการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างขั้วมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นว่าในการออกแบบเดินระบบบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามาก เพื่อให้สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ปัจจัยหลักที่สำคัญ คือ การออกแบบและการควบคุมระยะห่างระหว่างขั้ว ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาภายในกระบวนการบำบัดและประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ดังนั้นที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และจากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร จะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด

ตารางที่ 4.4 อันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วที่แตกต่างกัน

ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตารางเมตร)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (ซม.)	อันดับการ เกิดปฏิกิริยา (n)	ค่าคงที่การ เกิดปฏิกิริยา (k)	R ²
23.8	1	1.39	0.0069	0.9980
23.8	3	1.38	0.0060	0.9987
23.8	5	1.40	0.0047	0.9942
35.4	1	1.42	0.0073	0.9913
35.4	3	1.40	0.0056	0.9981
35.4	5	1.41	0.0047	0.9954
47.6	1	1.45	0.0066	0.9919
47.6	3	1.43	0.0062	0.9990
47.6	5	1.41	0.0053	0.9969
59.5	1	1.43	0.0083	0.9906
59.5	3	1.44	0.0062	0.9994

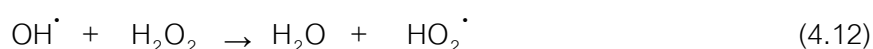
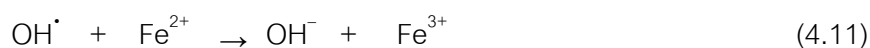
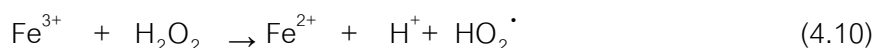
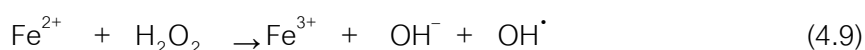
จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและค่าความขุ่นสูงมาก ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะใส เกิดการตกตะกอนแยกชั้นตะกอนอย่างเห็นได้ชัด แต่ถึงอย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการดังกล่าว ยังคงมีค่าซีโอดีที่ยังไม่ผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด 120 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าซีโอดีหลังผ่านการบำบัดอยู่ในช่วง 150 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในการบำบัดกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เมื่อเวลาการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียจะมีปริมาณลดน้อยลง ทำให้ปริมาณเฟอร์รัสและไฮดรอกไซด์ที่ผลิตออกมา มีโอกาสในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่เหลือในน้ำลดลง รวมถึงความสามารถในการเกิดกลไก sweep floc coagulation ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง และการเพิ่มขึ้นของปริมาณของตะกอนฟล็อก จำนวนมาก ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันมา

ประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยอาศัยหลักการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมันที่คงเหลือด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรงรองจาก ฟลูออรีน (ตารางที่ 2.3) โดยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กระบวนการเฟนตัน กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันและกระบวนการโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้น้ำเสียน้ำมันตัดหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

กระบวนการเฟนตัน

4.4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันจะเกิดขึ้นได้จากการทำปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างเฟอร์รัสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า เฟนตัน ซึ่งสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH[•]) ได้ ตามสมการ 4.9 - 4.12 โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะสามารถออกซิไดซ์กับอนุภาคของน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำได้ เนื่องจาก ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ซึ่งช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน โดยทั่วไปปฏิกิริยาเฟนตันสามารถเกิดขึ้นได้ดีในช่วงสภาวะพีเอชเป็นกรด ซึ่งอยู่ในช่วง 2 - 4 (ธนากร เมธาธรรม, 2554) ดังนั้นในการทดลองต้องควบคุมสภาวะของพีเอชให้อยู่ในช่วงดังกล่าวเพื่อลดการเปลี่ยนรูปเฟอร์รัสไปเป็นเฟอร์ริกไอออน รวมถึงเพื่อให้ปฏิกิริยาเฟนตันเกิดขึ้นได้ดีและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวม



จากการทดลองเพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวโดยกระบวนการเฟนตัน น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษามีค่าความเข้มข้นของน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสังเคราะห์ขึ้นจากการอ้างอิงข้อมูลการทดลองที่สัมพันธ์กับน้ำเสียดังกล่าวจากการบำบัดจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 90% (ความเข้มข้นน้ำมันตัดเหลือ ≈ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยกำหนดปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ช่วง 2.5 - 25 กรัมต่อลิตร ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาอัตราส่วนของ เฟอร์รัสซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4

อัตราส่วนโดยมวล ดังภาพที่ 4.21 และ 4.22 และควบคุมสภาวะให้น้ำเสียที่บำบัดมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3 - 4 เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ดี จากการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดในช่วง 15 นาทีแรกของการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ เมื่อเวลาการบำบัดผ่านไป 15 นาที เนื่องจากในช่วงแรกของการทดลอง ปริมาณเพอร์ร็อกไซด์ที่เติมจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้เป็นจำนวนมากดังสมการ 4.9 ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะไปออกซิไดซ์กับอนุภาคของน้ำมันในน้ำเสียได้ปริมาณสูง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดช่วงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มคงที่ ซึ่งอาจจะพิจารณาได้จาก

1) ปริมาณค่าความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันตกในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดมีปริมาณลดลงมาก จึงทำให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ผลิตขึ้นไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันแต่จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเพอร์ร็อกไซด์เอง ดังสมการ 4.12

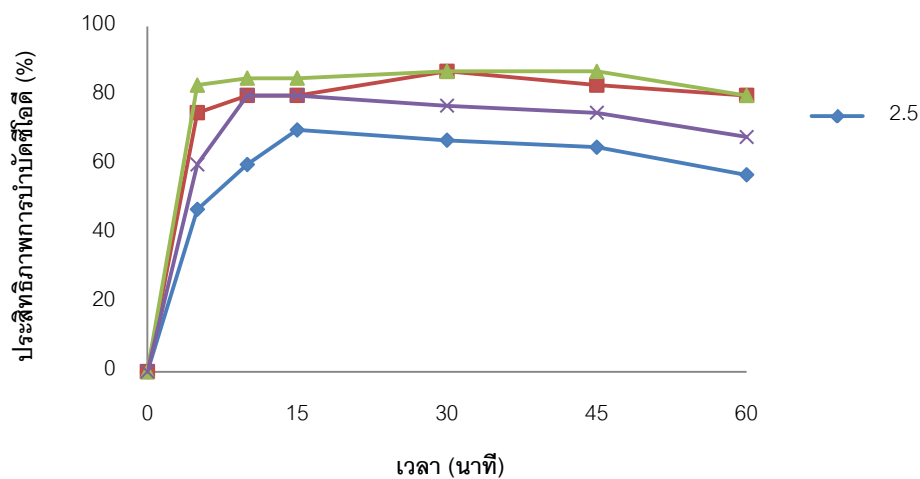
2) ปริมาณของไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลง เนื่องจากถูกทำปฏิกิริยากับเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ปริมาณเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณลดลง ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลง ดังสมการ 4.11 และ 4.12 (Anotai and Lu, 2010)

3) ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเพอร์ร็อกไซด์ออกซิไดซ์ไปเป็นเพอร์ริกไอออน เมื่อเพอร์ริกไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังสมการ 4.9 ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้นและส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

4) ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลงตามเวลา ทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ผลิตลดลง

จากการทดลองจะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเพอร์ร็อกไซด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่อัตราส่วนต่ำๆ (1:2.5) ปริมาณของไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ผลิตขึ้นมีปริมาณน้อย จึงยังคงทำให้มีอนุภาคของน้ำมันเหลืออยู่ในน้ำเสียปริมาณหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมากเกินค่าที่เหมาะสม ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเช่นกัน เนื่องจากสาเหตุที่กล่าวพิจารณาถึงข้างต้น รวมถึงปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในน้ำเสียสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังสมการ 4.12 เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (OOH) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์น้อยกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัลทำให้ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมันลดลง (Sheng and Chih, 2000) ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงมีแนวโน้มคงที่หรือลดลง โดยสรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนในช่วงระหว่าง 1:5 (เพอร์ร็อกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ 1:10 (เฟอร์รัส 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและค่าความขุ่นมากกว่า 80% แสดงให้เห็นว่าปัจจัยอัตราส่วนของเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด



ภาพที่ 4.21 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่อัตราส่วนเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลแตกต่างกัน

ภาพที่ 4.22 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่อัตราส่วนเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลแตกต่างกัน

จากการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการเฟนตัน โดยควบคุมสภาวะพีเอชของน้ำเสียในช่วง 3 - 4 พบว่าอัตราส่วนในการเติมสารเคมี เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากปริมาณสารเคมีที่เติม (เฟอร์รัสซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) ในการบำบัดจะส่งผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างกัน เพื่อผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลให้มีปริมาณมากพอเหมาะ (ปฏิกิริยาเฟนตัน) ในการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดโดยกระบวนการเฟนตันต้องใช้สารเคมีในการบำบัดทั้งเฟอร์รัสซัลเฟตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายทางด้านสารเคมี แต่จากการศึกษาพบว่ากระบวนการเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูง และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยารวดเร็วดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันมาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยอาศัยหลักการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมันด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัลเช่นกัน แต่ลดปริมาณการเติมสารเฟอร์รัสซัลเฟต เนื่องจากสามารถผลิตเฟอร์รัสไอออนจากขั้วอิเล็กโทรดได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี และมีความเป็นไปได้ที่จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงเช่นเดียวกับกระบวนการเฟนตัน

4.5 การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

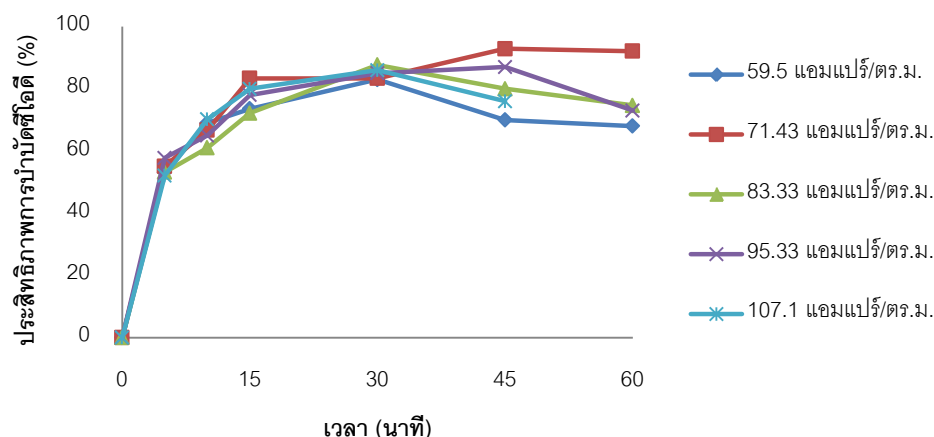
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจัดเป็นกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันรูปแบบหนึ่ง ที่อาศัยหลักการผลิตเฟอร์รัสไอออนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH[•]) ในการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมัน ดังสมการ 4.9 สำหรับในทางทฤษฎีกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะอาศัยหลักการในการบำบัดน้ำเสีย 2 กลไก คือ กลไกการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและกลไกการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงเพื่อทำลายอนุภาคของน้ำมัน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น โดยในการศึกษาส่วนนี้จะทำการศึกษาค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.1 กรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมในช่วง 60 - 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.5 - 25 กรัม การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัด ปริมาณเฟอร์รัสไอออนและค่าคงที่และอันดับในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อนำสภาวะที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบและการควบคุมระบบและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

4.5.1 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

จากการทดลองเป็นการศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วง 60 - 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร กำหนดให้ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 4.23 จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยในช่วงแรกการทดลองประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (15 นาทีแรกของการทดลอง) และเริ่มคงที่ โดยมีเหตุผลเดียวกับการทดลองเฟนตันที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากการศึกษาเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะภายในระบบมีปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ผลิตมากขึ้น จนมีปริมาณที่เหมาะสมกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงไป ซึ่งสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้นเพียงพอต่อการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเกินอัตราส่วนที่เหมาะสมประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง โดยอาจมีสาเหตุมาจาก

1) เฟอร์รัสไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลดังสมการ 4.9 ซึ่งทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนและค่าพีเอชสูงขึ้น และทำให้เฟอร์รัสไอออนถูกออกซิไดซ์เป็นเฟอร์ริกไอออนได้มากขึ้น ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาอเล็กโตรเฟนตันจึงลดลง

2) เฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออนที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นตะกอนฟลูอิดเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลง แสดงให้เห็นถึง การสิ้นเปลืองค่ากระแสไฟฟ้าเกินความจำเป็น โดยสรุปค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และระยะเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของสารเคมีระหว่างเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% ค่าซีไอดีของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอเล็กโตรเฟนตันมีค่าผ่านตามมาตรฐานกำหนด ตารางที่ 4.1

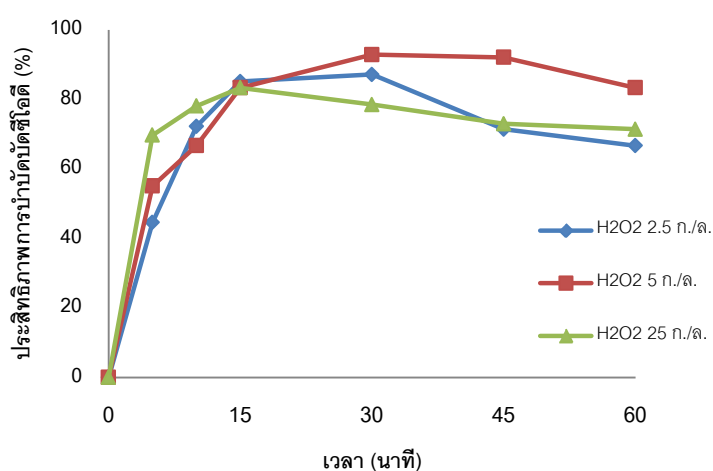


ภาพที่ 4.23 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอไซด์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร. ความเข้มข้นน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัมต่อลิตร

4.5.2 ศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

จากการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยได้ทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 2.5 5 และ 25 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ได้จากการศึกษาหาค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมและระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร โดยมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จากภาพที่ 4.24 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการทดลอง ซึ่งในช่วงแรกการทดลอง ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยกระบวนการเฟ้นต้น และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น เพราะปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ผลิตจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมันจึงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกินอัตราส่วนที่เหมาะสมกับเฟอร์รัสไอออน ($H_2O_2 > 25$ กรัมต่อลิตร) ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกินอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งเหลืออยู่ในน้ำเสียสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเปอร์ออกซีเรดิคัล (OOH) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์น้อยกว่าไฮดรอกซิลเรดิคัล ทำให้ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมันลดลง รวมถึงประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมลดลง โดยสรุปที่ค่าความหนาแน่น

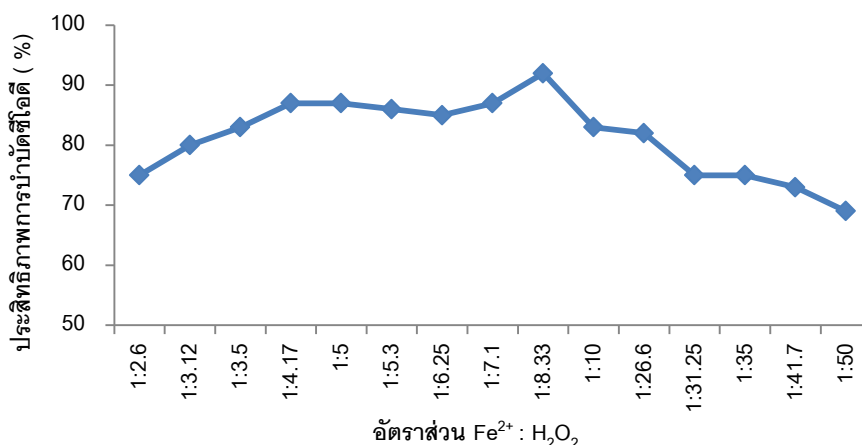
กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร. และค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุด 90% น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด (ตารางที่ 4.1) จากการศึกษาจะพบว่าปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม เป็นปัจจัยหลักสำคัญในการออกแบบและการควบคุมระบบ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นหัวข้อต่อไปจะทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด



ภาพที่ 4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร. ความเข้มข้นน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.5.3 ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งทำการศึกษาที่ช่วง 60 - 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ช่วง 2.5 - 25 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ในส่วนนี้จะประยุกต์ใช้ข้อมูลข้างต้นเพื่อวิเคราะห์ อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่เหมาะสม โดยปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ใช้เทียบอัตราส่วนที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน สามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ดังสมการ 4.6 (ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 500 - 900 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากภาพที่ 4.25 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนเฟอร์รัส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกัน ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดคือ 1:8.33 โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% (ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่เหมาะสมของการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน (1:5 - 1:10) จึงแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนเป็นปัจจัยหลักสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพบำบัดต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน เนื่องจากถ้าใช้อัตราส่วนของเฟอร์รัส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากหรือน้อยเกินกว่าค่าที่เหมาะสมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในกระบวนการเฟนตัน โดยสรุป ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 60 - 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.5 - 5 กรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถเทียบเป็นอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออน/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 1: 5 - 1:10 และที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 - 30 นาที พบว่าที่สภาวะการออกแบบดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 80% และค่าซีไอดีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดโดยหัวข้อถัดไป จะพิจารณาถึง ตัวแปรอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับการเดินระบบโดยรวม เช่น ค่าการนำไฟฟ้า ค่าของแข็งละลายน้ำ ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ค่าคงที่และอันดับในการเกิดปฏิกิริยา



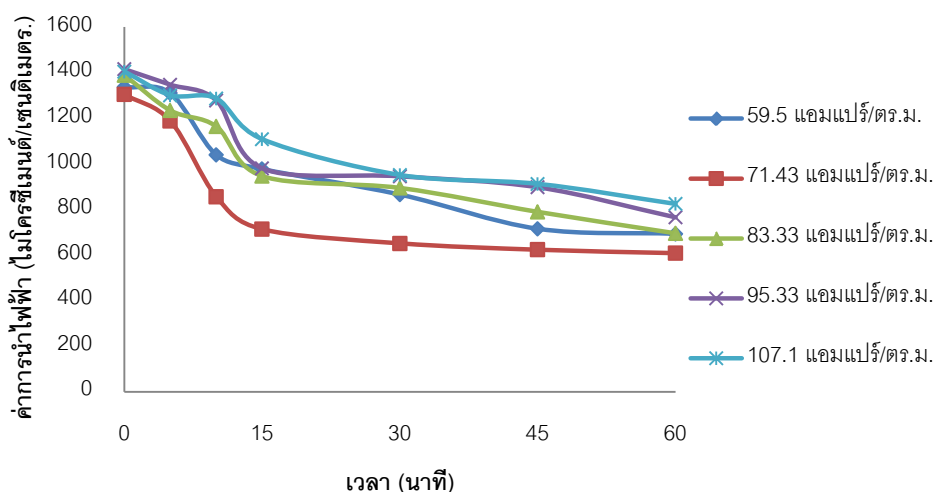
ภาพที่ 4.25 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่อัตราส่วนเฟอร์รัส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่แตกต่างกัน

4.5.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ช่วง 60 – 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากภาพที่ 4.26 ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นจะมีค่าประมาณ 1,300 - 2,500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะมีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าน้ำเสียเริ่มต้น (191 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) เนื่องจากปฏิกิริยาเฟนตันจะเกิดได้ดีในช่วงสภาวะพีเอช 3 - 4 จึงต้องทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้เหมาะสมโดยการเติมกรด ซึ่งทำให้น้ำเสียมีประจุไอออน (H^+) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาจะพบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงตามเวลา โดยเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงมากขึ้น เนื่องจากปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สามารถออกซิไดซ์กับอนุภาคน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวได้มากขึ้น และทำให้อนุภาคของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง โดยปริมาณไอออนมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ถ้าปริมาณไอออนมีค่าลดลง ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากเกินไปจนเกินค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เพราะ ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำมีปริมาณมากเกินไปจนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้มีปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เป็นประจุบวกเหลืออยู่ในน้ำเสียเป็น

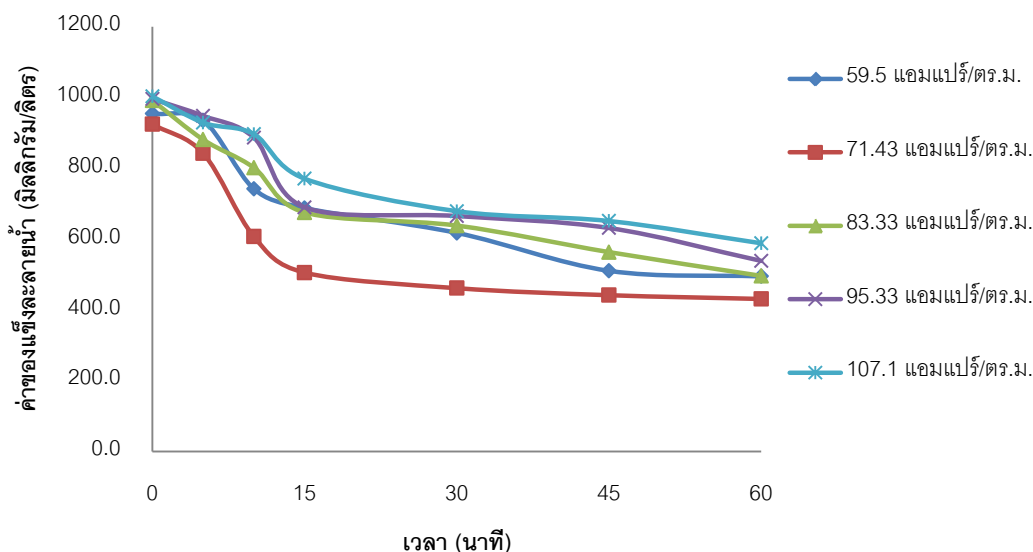
ปริมาณมากและไม่อยู่ในช่วงเฟอริร์สอิคอน/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงและทำให้มีอนุภาคของประจุน้ำมันบางส่วนยังไม่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าโดยรวมยังคงมีค่าสูงอยู่



ภาพที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำตามระยะเวลาการบำบัด ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ช่วง 60 - 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ดังภาพที่ 4.27 โดยเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าปริมาณค่าของแข็งละลายน้ำจะลดลงตามเวลามากขึ้น และที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าของแข็งละลายน้ำจะมีปริมาณลดลงมากที่สุด จากการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในข้างต้นจะพบว่า เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่เหมาะสมประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามกัน ซึ่งทำให้อนุภาคของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง เนื่องจากการออกซิไดซ์และมีบางส่วนเกิดเป็นฟลอคตกตะกอน ทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง แต่เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากเกินไปค่าที่เหมาะสมค่าของแข็งละลายน้ำจะลดลงได้ปริมาณน้อย เนื่องจากเหตุผลเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า

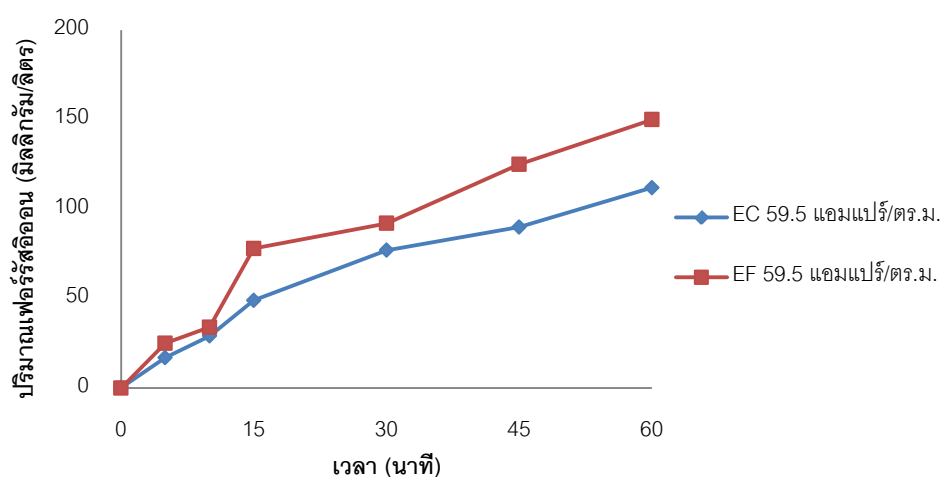
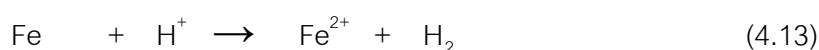


ภาพที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

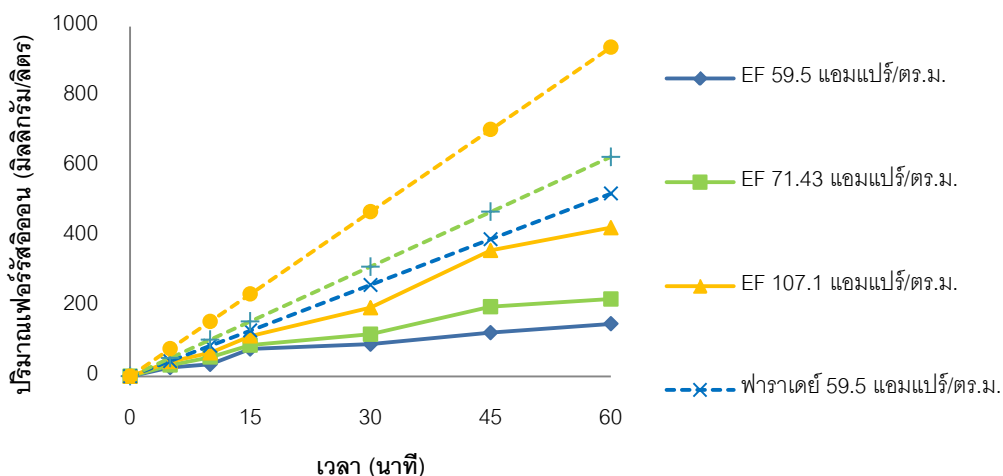
ปริมาณเฟอร์รัสออกไซด์ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

ในส่วนี้จะเป็นการศึกษาปริมาณเฟอร์รัสออกไซด์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ในช่วง 60 – 108 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร จากภาพที่ 4.28 จะพบว่าปริมาณเฟอร์รัสออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าปริมาณเฟอร์รัสจะสามารถผลิตได้มากขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดจะถูกกัดกร่อนมากขึ้น โดยในการทำปฏิกิริยาเฟนตันต้องควบคุมสภาวะพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในสภาวะ 3 - 4 ซึ่งทำให้น้ำเสียภายในกระบวนการมีสภาวะเป็นกรด จึงส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดมาก (มันลินและมันรักษ์, 2552) ดังสมการ 4.13 ทำให้ปริมาณเฟอร์รัสที่ผลิตออกมาจากขั้วแอโนดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมีปริมาณที่ผลิตออกมาได้มากขึ้นและมีปริมาณฟองก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีดักชันจากขั้วแคโทดเพิ่มมากขึ้น จากภาพที่ 4.28 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบปริมาณเฟอร์รัสออกไซด์ในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน พบว่าปริมาณเฟอร์รัสออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะมีปริมาณ เฟอร์รัสออกไซด์สูงกว่ากระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้า อาจเนื่องมาจากการควบคุมสภาวะพีเอชของน้ำเสียให้เป็นกรด จึงส่งผลกระทบต่อกรกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดมากกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ทำให้ปริมาณเฟอร์รัสออกไซด์ที่ผลิตมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าปริมาณ

เฟอร์รัสที่ได้จากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี (กฎฟาราเดย์) เนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เกิดขึ้นถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำมันถึง 2 กลไกด้วยกัน ได้แก่ 1) กลไกโคแอกกูเลชันโดยเฟอร์รัสเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนฟล็อก 2) กลไกการทำปฏิกิริยาเฟนตันเพื่อผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลในการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมัน จึงทำให้ปริมาณของเฟอร์รัสไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำหลังจากผ่านการบำบัดมีปริมาณน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี



ภาพที่ 4.28 ปริมาณเฟอร์รัสไอออนภายในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร และ H_2O_2 5 กรัมต่อลิตร.

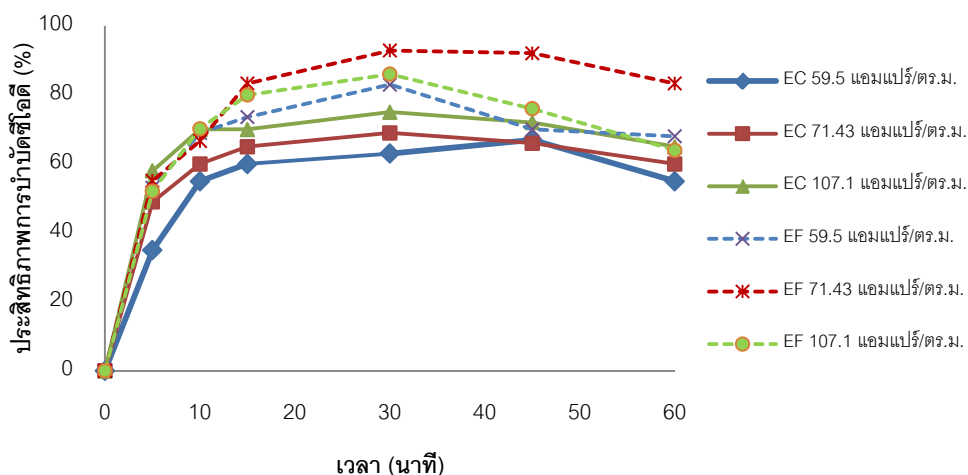


ภาพที่ 4.29 ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

จากภาพที่ 4.30 เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากัน กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเป็นกระบวนการกำจัดอนุภาค โดยกลไก Coagulation และ Flocculation ซึ่งเมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้น อนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลงมาก ส่งผลให้โอกาสการสัมผัสระหว่างอนุภาคของน้ำมันกับเฟอร์รัสคลอไรด์มีปริมาณลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเริ่มคงที่ ส่วนในกระบวนการ อิเล็กโทรเฟนตันจะเกิดกลไกในการกำจัดอนุภาคของน้ำมัน 2 กลไก คือ กลไก Coagulation และ Flocculation และกลไกการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมันด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัลซึ่งสามารถออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมันที่ยังคงเหลือในน้ำเสียจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มมากขึ้น โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประสิทธิภาพการบำบัดจะขึ้นกับอัตราส่วนเฟอร์รัส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมโดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร เทียบเป็นอัตราส่วน 1 : 8.33 ให้

ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน



ภาพที่ 4.30 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ความเข้มข้นน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร กระบวนการ EF H₂O₂ 5 กรัมต่อลิตร

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียไขมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันสรุปได้ว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดจะให้ปริมาณเพอร์ร็อกซิออนที่ปริมาณสูงกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เนื่องจากต้องทำการควบคุมสภาวะพีเอชของน้ำเสียในช่วง 3 - 4 ส่งผลให้ปริมาณเพอร์ร็อกซิออนและฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมีปริมาณมากเนื่องจากการกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดที่มีความรุนแรงมากขึ้นทำให้ไอออนสามารถผลิตได้ปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้มากขึ้น แต่ข้อเสีย คือ ระยะเวลาการใช้งานของขั้วอิเล็กโทรดจะสั้นลงเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดถูกกัดกร่อนอย่างรุนแรงในสภาวะน้ำเสียที่เป็นกรด และส่งผลให้ปริมาณฟลอคตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพิ่มขึ้น จึงทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายทางด้านกรเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดและการกำจัดฟลอคเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสีย พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำจะมีค่าสูงกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าค่อนข้างสูง เนื่องจากการเติมกรดเพื่อปรับสภาพพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน จึงทำให้น้ำเสียมี

ปริมาณค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำสูงตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการทดลอง จึงเป็นอีกหนึ่งปัญหา แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังคงมีค่าของแข็งละลายน้ำผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า แต่ข้อเสียที่สำคัญ คือ เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ขั้วอิเล็กโทรดถูกกัดกร่อนมากขึ้นจากน้ำเสียที่มีสถานะเป็นกรด ส่งผลให้มีปริมาณฟลอคตะกอนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในอนาคตเราจึงควรทำการศึกษาหาแนวทางในการแก้ปัญหาลดปริมาณฟลอคตะกอนที่เกิดขึ้น โดยอาจทำการศึกษาเปลี่ยนชนิดของขั้วอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น จึงเป็นอีกปัจจัยที่ควรคำนึงถึง

4.5.5 ศึกษาอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่ออันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถหาได้จากวิธี differential method เช่นเดียวกับกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าค่าอันดับการเกิดปฏิกิริยา (n) มีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจากตารางอาจจะสรุปได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 นอกจากนี้ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (k) จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกินอัตราส่วนที่เหมาะสม (71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร) ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเนื่องจากการไฮดรอกซิลแรดิเคิลลดลง และเกิดการทำปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลแรดิเคิลกับเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกินอัตราส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของน้ำมันลดลง ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง ดังนั้นจะพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณเฟอร์รัสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการออกแบบเดินระบบบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันไม่จำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและการเติมสารเคมีปริมาณมาก แต่ควรพิจารณาค่าอัตราส่วนของสารเคมีที่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.5 อันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตารางเมตร)	ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (กรัม./ลิตร.)	อันดับการเกิดปฏิกิริยา (n)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k)
59.5	2.5	1.09	0.1100
59.5	5	1.88	0.0014
71.43	2.5	0.82	0.0014
71.43	5	0.95	0.3200
83.33	2.5	0.80	0.0036
83.33	5	1.18	0.1260
95.23	2.5	1.05	0.1310
95.23	5	1.28	0.0780
107.1	2.5	1.63	0.0063
107.1	5	1.03	0.1600
107.1	25	1.75	0.0130

จากการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน พบว่าค่าอัตราส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ได้จากการกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล (ปฏิกิริยาเฟนตัน) เพื่อออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมัน ดังนั้นอัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัด แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันต้องอาศัยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ทำให้ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เกิดขึ้นระหว่างการเข้าทำปฏิกิริยามีปริมาณลดลงเนื่องจาก

1) เฟอร์รัสอิออนบางส่วนถูกนำไปใช้ในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า 2) เฟอร์รัสอิออนถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์ริกอิออนได้ง่าย ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันที่ใช้แสงยูวีร่วมด้วย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำลายเสถียรภาพของน้ำมันโดยปฏิกิริยาเฟนตันเช่นเดียวกัน การนำแสงยูวีมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน เรียกว่า กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน โดยแสงยูวีจะช่วยเพิ่มปริมาณของเฟอร์รัสอิออนและปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัล เนื่องจากแสงยูวีสามารถออกซิไดซ์ เฟอร์ริกอิออนให้เป็นเฟอร์รัสอิออนได้รวดเร็วและยังได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันและการทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น

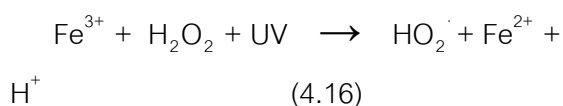
4.6 การศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

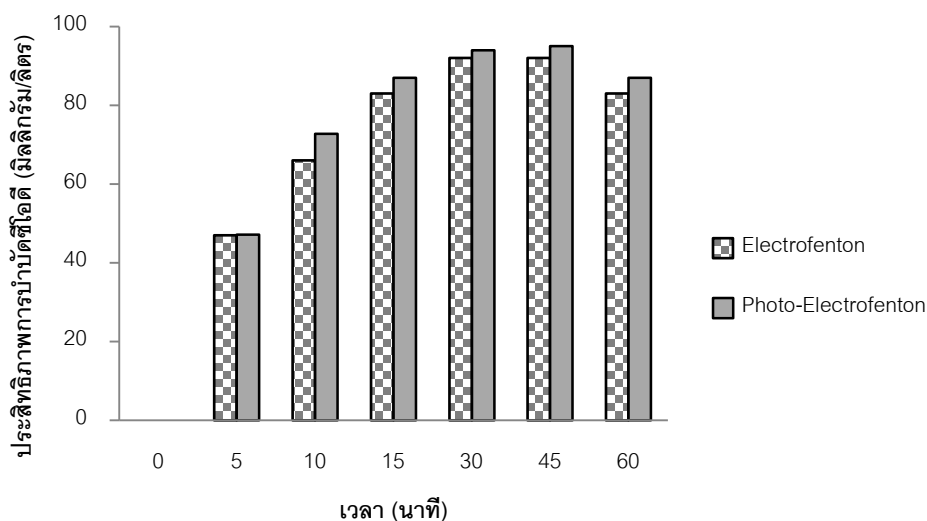
4.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.1 กรัมต่อลิตรโดยนำค่าอัตราส่วนของสารเคมี เฟอร์รัสอิออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ศึกษามาแล้วข้างต้น มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร เทียบเป็นอัตราส่วนเฟอร์รัส/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:8.33 และทำการควบคุมสภาวะพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 3 - 4 จากภาพที่ 4.31 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีจะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยในช่วงแรกของการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ แต่เมื่อเวลาการบำบัดผ่านไป 45 นาทีพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากในช่วงแรกของการทดลองมีปริมาณของไฮดรอกซิลแรดิคัลปริมาณมากจึงสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันสูง เพราะ ปริมาณไฮดรอกซิลที่เพิ่มมากขึ้นมีผลมาจาก

- 1) การเกิดปฏิกิริยาเฟนตันของเฟอร์รัสอิออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 2) การทำปฏิกิริยาของแสงยูวีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ 4.14
- 3) แสงยูวีสามารถเปลี่ยนรูปเฟอร์ริกอิออนให้เป็นเฟอร์รัสอิออนพร้อมผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมัน ดังสมการ 4.15

เมื่อเวลาการบำบัดผ่านไป 10 นาทีแรกประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันมีปริมาณลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลมีโอกาสในการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมันลดลง โดยปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลบางส่วนเกิดการทำปฏิกิริยากับสารอื่นในน้ำเสียจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เช่น การเข้าทำปฏิกิริยากับเพอร์ออกซิออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังสมการ 4.10 และ 4.11 ทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเริ่มคงที่และลดลง จากภาพที่ 4.31 จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาทีให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดที่ 95% ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของเพอร์ริกซิออนด้วยแสงยูวีเป็นเพอร์ออกซิออนไม่มีผลชัดเจนมากนัก เนื่องจากปริมาณเพอร์ออกซิออนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันมีปริมาณค่อนข้างมากอยู่แล้ว เพราะการกักตัวของขั้วแอโนดในสถานะที่น้ำเสียเป็นกรด ทำให้ปริมาณเพอร์ออกซิออนที่ผลิตขึ้นมีปริมาณมากขึ้น ทำให้การเปลี่ยนรูปของเพอร์ริกเป็นเพอร์ออกซิออนด้วยแสงยูวีส่งผลกระทบเกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันไม่ชัดเจน เมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดที่อาศัยการออกซิเดชันด้วยแสงยูวีร่วมกับกระบวนการอื่น อาทิ เช่น แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสงยูวีร่วมกับเพอร์ออกไซด์ ซึ่งแสงยูวีจะมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของเพอร์ริกและเพอร์ริกค่อนข้างสูง และประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคภายในน้ำเสียค่อนข้างชัดเจน ส่วนอีกหนึ่งสาเหตุคือ ปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันได้น้ำเสียลดลง ซึ่งทำให้โอกาสในการทำปฏิกิริยากับอนุภาคน้ำมันจึงลดน้อยลง ดังนั้นแสงยูวีที่ใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคของน้ำมันจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำเมื่อผ่านเวลาการบำบัดที่เหมาะสมแล้ว





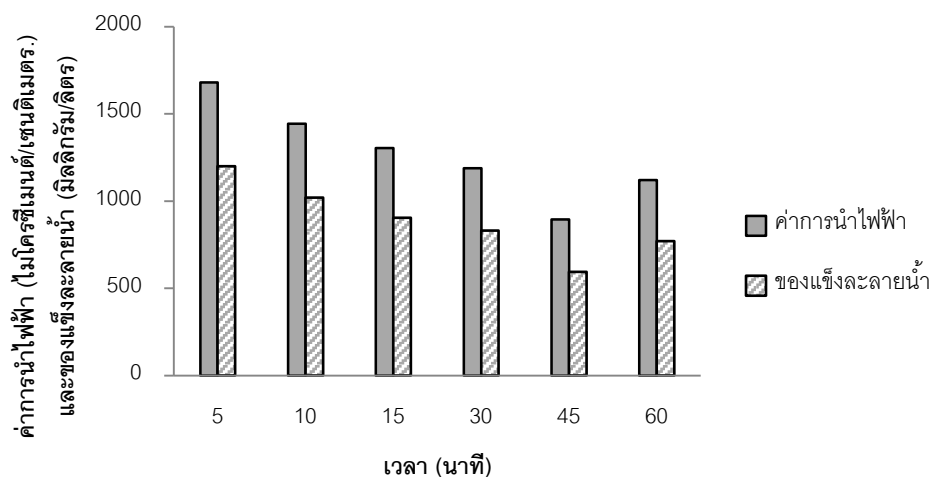
ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.46 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันและกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

4.6.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียน้ำมันตัด

การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำ

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตรที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยควบคุมสภาวะพีเอชในการบำบัดที่ช่วง 3 - 4 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ดี โดยน้ำเสียที่มีการปรับสภาพพีเอชแล้วจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าน้ำเสียก่อนการบำบัด เนื่องจากการเติมกรดเพื่อปรับสภาพพีเอช ทำให้น้ำเสียมีประจุไอออน (H^+) เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นการบำบัดมีค่าสูง จากภาพที่ 4.32 จะพบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามเวลา เนื่องจากเมื่อเวลาการบำบัดมากขึ้น ปริมาณของอนุภาคของน้ำมันในน้ำเสียจะลดลง ซึ่งทำให้มีประจุในน้ำเสียลดลง โดยค่าการนำไฟฟ้าในช่วงแรกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลมีปริมาณมาก จึงทำให้มีโอกาสในการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวได้มากและทำให้อนุภาคประจุลบของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มมากขึ้นค่าการนำไฟฟ้าเริ่มคงที่และ

เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันที่ลดลง โอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของน้ำมันและไฮดรอกซิลแบริดเคิลจึงลดลง ทำให้น้ำเสียยังคงมีอนุภาคประจุลบของน้ำมันเหลืออยู่หลังผ่านการบำบัด แต่เมื่อเวลาการบำบัดมากกว่า 45 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่มากกว่าระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยมีปริมาณเฟอรัสไอออนหรือเฟอร์ริกไอออนที่ผลิตออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดมากเกินไปที่จะสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมัน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้มีปริมาณเฟอรัสไอออนที่เป็นประจุบวกเหลืออยู่ในน้ำเสียเป็นปริมาณมาก ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลง เนื่องจากอนุภาคของประจุน้ำมันบางส่วนยังไม่ถูกกำจัดแยกออกจากน้ำเสีย และมีประจุของเฟอรัสและเฟอร์ริกที่เหลืออยู่ในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงได้ปริมาณน้อย โดยค่าของแข็งละลายน้ำก็เป็นคุณลักษณะหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับค่าการนำไฟฟ้า โดยค่าของแข็งละลายน้ำจะลดลงตามเวลาและเริ่มคงที่ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า เพราะค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับค่าของแข็งละลายน้ำตามดั่งสมการ 4.5



ภาพที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, H_2O_2 5 กรัมต่อลิตร, และระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร.)

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน โดยประยุกต์ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน พบว่า

กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์เพอร์ริคออกไซด์ไปเป็นเฟอร์รัสออกไซด์ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเฟนตันนั้นเกิดได้ไม่ดีหรือเห็นผลไม่ชัดเจน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ไม่ได้ใช้แสงยูวี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเห็นว่าไม่ควรนำแสงยูวีมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่เดินระบบโดยใช้ Fe เป็นขั้วแอโนด เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแล้ว ยังส่งผลทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการติดตั้งหลอดยูวี ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยรวม เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดในการนำระบบไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้จริง ในส่วนนี้จะทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสีย น้ำมันตัดโดยการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการออกแบบเดินระบบแบบต่อเนื่องต่อไป

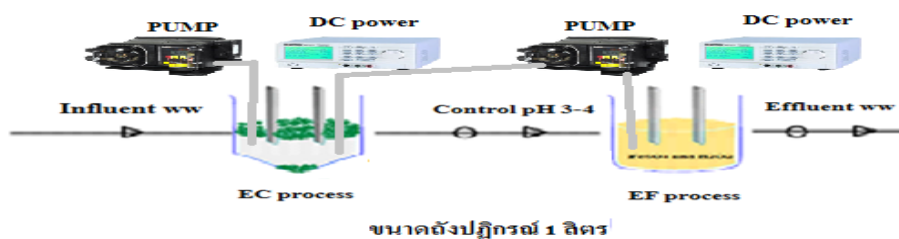
4.7 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากผลการศึกษาระบบการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยการเดินระบบแบบทีละเท (Batch system) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐาน ดังนั้น ในส่วนนี้จะประยุกต์ใช้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการในการเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ดังสรุปในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 ค่าการออกแบบและการควบคุมระบบที่เหมาะสมด้วยกระบวนการต่างๆ โดยการเดินระบบแบบทีละเท

ตัวแปร	กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า	กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน
ระยะห่างระหว่างขั้ว	1 เซนติเมตร	1 เซนติเมตร
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
ค่าความเข้มข้น H_2O_2	-	5 กรัมต่อลิตร

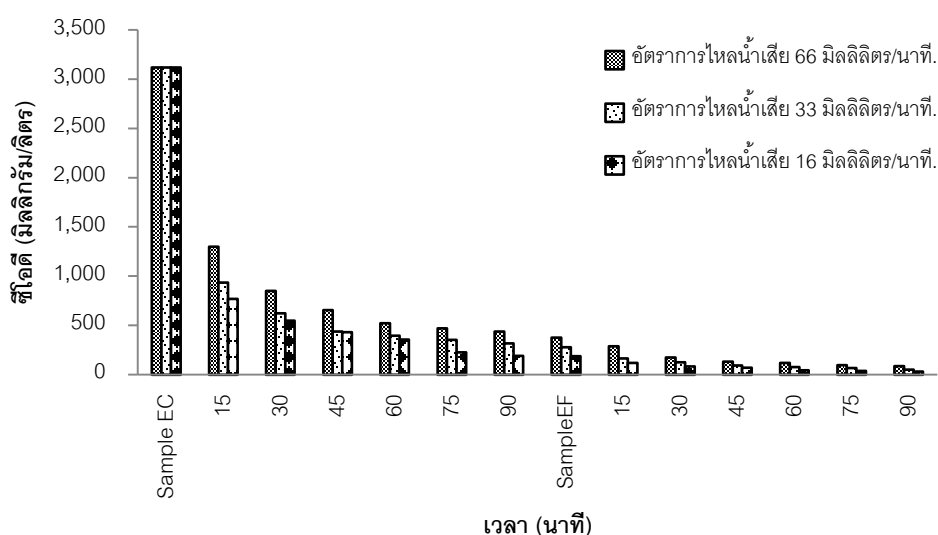
นอกจากนี้ รูปแบบการติดตั้งระบบการบำบัดแบบต่อเนื่องของทั้งสองกระบวนการสามารถแสดงดังภาพที่ 4.33 เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของเฟสน้ำเสีย (16 33 และ 66 มิลลิลิตร ต่อ นาที) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม ทั้งนี้ อัตราการไหลของเฟสน้ำเสียที่ศึกษาข้างต้นจะสัมพันธ์กับระยะเวลาการกักน้ำ (Detention time) เท่ากับ 15 30 และ 60 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ กล่าวได้ว่าการเดินระบบในส่วนแรกจะเป็นการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-coagulation process) โดยเมื่อถึงระยะเวลาการกักเก็บจะทำการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบการบำบัดที่ 2 คือ กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน เนื่องจากการบำบัดขั้นต้นเป็นการกำจัดอนุภาคของน้ำมันโดยกลไกโคแอกกูเลชัน และในส่วนที่สองจะเป็นกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton process) ซึ่งบำบัดอนุภาคน้ำมันที่คงเหลือด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs process) โดยทำการติดตั้งระบบและเดินระบบในสภาวะที่เหมาะสม ตารางที่ 4.5 และพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาการเดินระบบประมาณ 90 นาที



ภาพที่ 4.33 การติดตั้งถังปฏิกรณ์กระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดทั้ง 3 อัตราการไหล (ดังแสดงในภาพที่ 4.34) พบว่า ที่อัตราการไหล 66 มิลลิลิตรต่อนาที (ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 15 นาที) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจะมีค่าซีไอดีสูงที่สุด รวมถึงมีค่าลดลงเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่ระยะเวลากว่า 90 นาที ในกรณีนี้ เราสามารถอธิบายผลลัพธ์ข้างต้นกล่าวคือ น้ำเสียที่ผ่านเข้ากระบวนการบำบัดมีอัตราการไหลที่สูงหรือมีค่าระยะเวลาการกักน้ำที่ต่ำเกินไป (15 นาที ซึ่งต่ำกว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการศึกษาแบบทีละเทที่กล่าวถึงข้างต้นประมาณ 30 – 45 นาที) ดังนั้น จึงส่งผลทำให้มีค่าภาระบรรทุกของปริมาณอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet loading rate) ในน้ำเสียไหลผ่านเข้าสู่ระบบสูงและเร็วเกินกว่าที่ระบบจะบำบัดน้ำเสียได้ ซึ่งทำให้อนุภาคของน้ำมันมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างเฟอรัสเพื่อทำลาย

เสถียรภาพและเกิดเป็นตะกอนฟล็อกร่วมกับไฮดรอกไซด์อิออนลดน้อยลง ดังนั้น จึงส่งผลทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจึงมีอนุภาคของน้ำมันเหลืออยู่ในน้ำเสียปริมาณมาก และทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมที่ได้มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ EC ยังคงมีค่าไม่ผ่านตามมาตรฐาน (120 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้น เมื่อพิจารณาในส่วนของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันซึ่งเป็นการออกซิไดซ์ของอนุภาคน้ำมันในส่วนที่เหลือด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัลพบว่า สามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ 70% และค่าซีไอดีของน้ำเสียมีค่าผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้ง โดยที่ระยะเวลาที่กักน้ำในส่วนนี้ (15 นาที) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการศึกษาแบบที่ละของกระบวนการ EF ประมาณ 15 – 20 นาที



ภาพที่ 4.34 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและอิเล็กโทรเฟนตันที่อัตราการใช้ไฮดรอกไซด์ 66 มิลลิกรัมต่อนาที 33 มิลลิกรัมต่อนาที และ 16 มิลลิกรัมต่อนาที

จากนั้น เมื่อพิจารณาผลการศึกษาที่อัตราการใช้ไฮดรอกไซด์ 33 มิลลิกรัมต่อนาที (ระยะเวลาการกักเก็บ 30 นาที) และ 16 มิลลิกรัมต่อนาที (ระยะเวลาการกักเก็บ 60 นาที) ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราการใช้ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 66 มิลลิกรัมต่อนาที (ระยะเวลาการกักเก็บ 15 นาที) เนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่เกิดขึ้นมีช่วงระยะเวลาสัมผัสเพียงพอกับการทำปฏิกิริยากับอนุภาคน้ำมันที่เข้าสู่ระบบบำบัด จึงทำให้อนุภาคของน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพด้วยเฟอร์รัสอิออนได้มากขึ้น รวมถึงเกิดเป็นฟล็อกตะกอนร่วมกับไฮดรอกไซด์อิออนด้วยกลไก sweep floc coagulation ได้ดียิ่งขึ้น ทำให้

ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นร่วมกับอนุภาคน้ำมันสามารถถูกแยกออกจากระบบได้ดียิ่งขึ้นด้วยกระบวนการทำให้ลอยจากฟองก๊าซไฮโดรเจน โดยระบบ EC จะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่ในช่วงระยะเวลา 70 - 90 นาที ทั้งนี้ ถึงแม้ว่ากรณีการเดินระบบที่อัตราการไหล 16 มิลลิลิตรต่อนาที จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดช่วงแรกจะลดลงมากกว่า (ระยะเวลาสัมผัสของเฟอรัสไอออนกับอนุภาคของน้ำมันที่สูงขึ้น) แต่เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัวจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมจะมีค่าใกล้เคียงกับอีกสองกรณีที่กล่าวถึงข้างต้น ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการที่ความหนาแน่น (จำนวน) ของอนุภาคน้ำมันมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จะส่งผลทำให้โอกาสของเฟอรัสไอออนในการเข้าสัมผัสเพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันลดลง ดังนั้น จึงทำให้มีอนุภาคของน้ำมันบางส่วนยังคงเหลืออยู่ในน้ำเสีย (ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงเริ่มคงที่) ในช่วงท้าย โดยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าไม่ผ่านตามมาตรฐาน จึงมีความจำเป็นต้องนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นตอนแรกเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเป็นการบำบัดช่วงท้าย (Post treatment) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยการใช้ปฏิกิริยาเฟนตันผลิตไฮดรอกซิลเรดิเคิลในการทำลาย (ออกซิไดซ์) อนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ซึ่งที่อัตราการไหลทั้ง 2 อัตราให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 80% รวมถึงน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยที่ระยะเวลาพักน้ำในสัมนี่ (30 และ 60 นาที) พบว่ามีค่าสูงกว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการศึกษาแบบที่ละเทของกระบวนการ EF ประมาณ 15 - 20 นาที

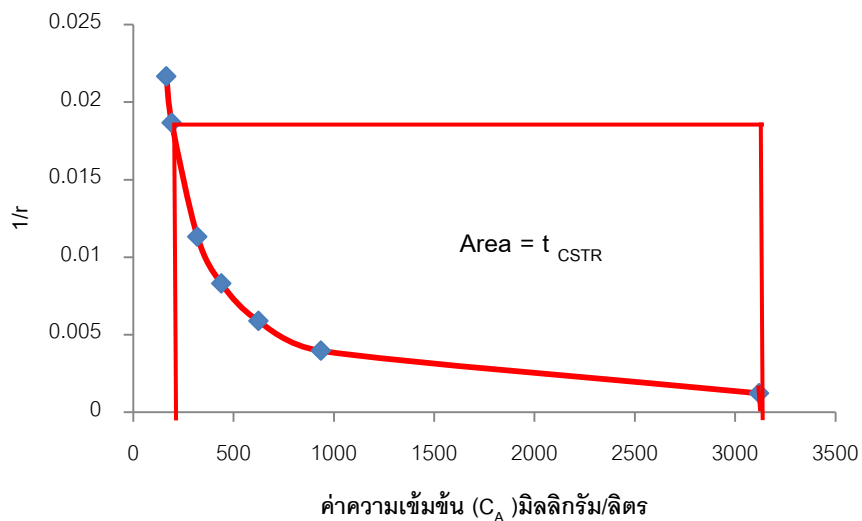
ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องและแบบที่ละเท (ทั้งจากกระบวนการ EC และ EF) เราสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ในทางปฏิบัติควรเลือกออกแบบระยะเวลาพักน้ำในการเดินระบบแบบต่อเนื่องประมาณ 1 - 1.5 เท่า ของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการศึกษาแบบที่ละเท โดยที่การเลือกออกแบบที่ระยะเวลาพักน้ำที่สูงเกินไปนั้น นอกจากจะส่งผลเสียต่อค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและออกแบบระบบโดยรวมแล้ว ยังอาจส่งผลต่อปริมาณฟล็อกของตะกอนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการอีกทางหนึ่งด้วย โดยจากการทดลองพบว่า อัตราการไหลที่ 16 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีปริมาณฟล็อกที่เกิดขึ้นค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับอีก 2 กรณีที่มีค่าอัตราการไหลสูงกว่า เนื่องจากปริมาณเฟอรัสที่เกิดขึ้นภายในอัตราการไหลที่ 16 มิลลิลิตรต่อนาที กระบวนการมีโอกาสและระยะเวลาในการสัมผัสไฮดรอกไซด์ไอออนกับอนุภาคน้ำมันตัดที่สูงเกินไป จึงอาจทำให้ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นของ Fe(OH)_2 และ Fe(OH)_3 ในปริมาณที่มากเกินไป ดังนั้น จากการศึกษาข้างต้นเราสามารถสรุปแนว

ทางการออกแบบที่เหมาะสมของกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดแบบต่อเนื่องในทางปฏิบัติกล่าวคือ ค่าสภาวะที่เหมาะสมในการเลือกใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในการบำบัดขั้นต้นโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า คือ ค่าระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสม 1 เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร. ในการบำบัดขั้นที่ 2 กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน เลือกออกแบบที่สภาวะ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร เป็นค่าอัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล (1 : 8.33) โดยปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดจากการศึกษาและออกแบบระบบให้เหมาะสมทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด

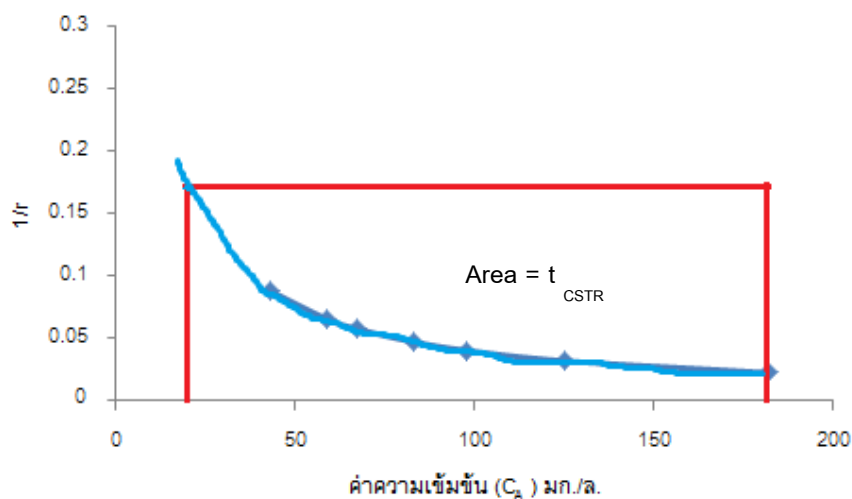
การทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

การบำบัดน้ำเสียในระบบสิ่งแวดล้อมจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลของเวลาและอัตราการไหลเป็นหลัก ซึ่งรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่างๆ เช่น อัตราการไหล และระยะเวลาในการทำปฏิกริยา โดยทั่วไปถังปฏิกริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อมมีอยู่หลายประเภท อาทิ ถังปฏิกริยาแบบท่อ (Plug-Flow Reactor) ถังปฏิกริยาแบบกวนผสมบวมรูปไหลต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) โดยในการศึกษาพบว่ารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยามีลักษณะใกล้เคียงกับ CSTR (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2554) เนื่องจาก รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาเป็นการไหลลงถังปฏิกริยาและเกิดการกวนผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวกัน ถัง CSTR นิยมใช้ในระบบ Coagulation และสามารถรับความเข้มข้นสูงๆ ได้ เพราะ น้ำเสียความเข้มข้นสูงที่ไหลเข้าสู่ถังปฏิกริยาจะถูกเจือจางทั่วถังปฏิกริยา โดยเราสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นขาออกได้จากสมการ (4.17) เมื่อทราบค่า อัตราการไหล(Q) ขนาดของถังปฏิกริยา (V) ความเข้มข้นขาเข้า (C_0) และระยะเวลาในการกักเก็บ θ เราสามารถหาค่าระยะเวลาในการทำปฏิกริยาที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นขาเข้า (C_0) และความเข้มข้นที่ออกจากระบบ (C_A) รวมถึงอัตราเร็วของปฏิกริยา (r_A) ได้จากค่าพื้นที่ใต้กราฟ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{1}{r_A}$ และค่า C_A เมื่อเราทราบระยะเวลาในการกักเก็บ และค่าความเข้มข้นขาเข้า (C_0) เราสามารถทำนายค่าความเข้มข้นขาออกได้จากกราฟ แสดงดังภาพที่ 4.35 และ 4.36 โดยพื้นที่ใต้กราฟจะมีค่าเท่ากับ

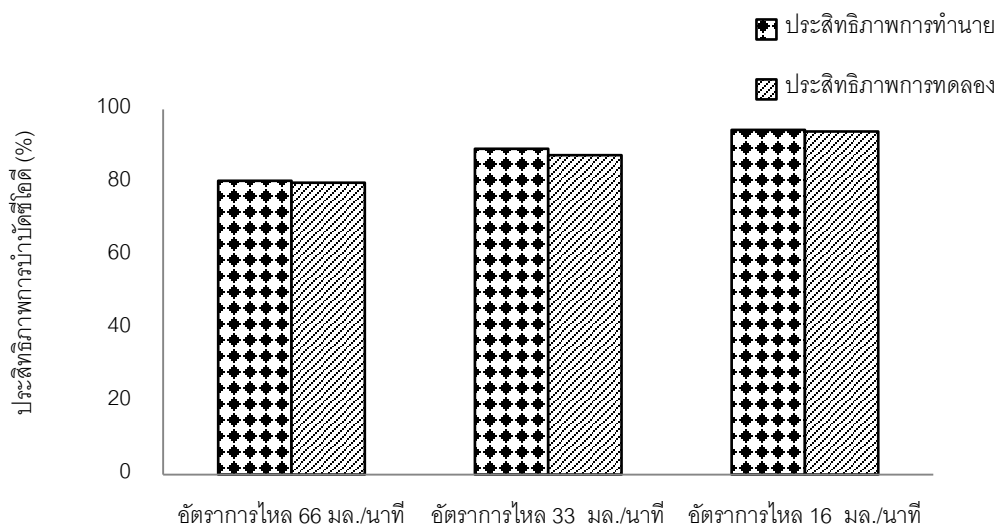
ระยะเวลาได้การกักเก็บ ซึ่งการศึกษานี้มีรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบ CSTR แสดงดังภาพที่ 4.35 และ 4.36



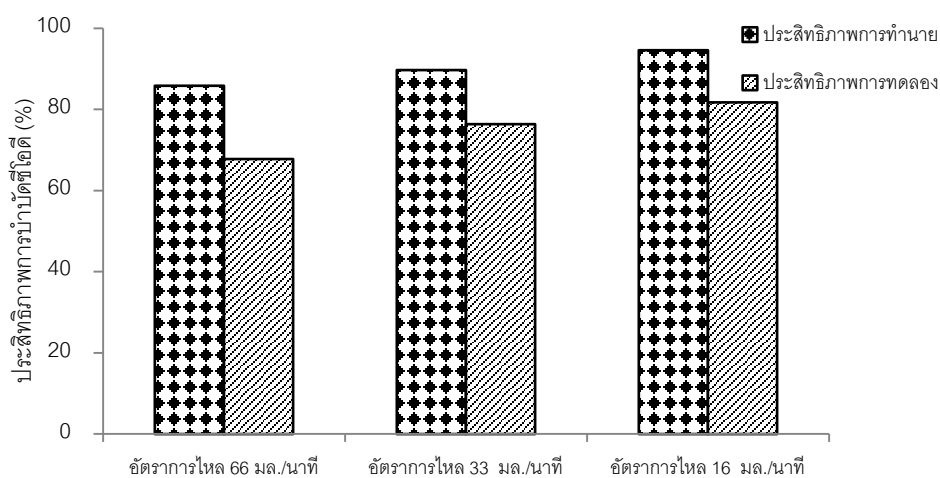
ภาพที่ 4.35 การคำนวณหาความเข้มข้นขาออกของถังปฏิกริยาแบบต่างๆ ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 30 นาที ในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ด้วยวิธีกราฟฟิค (Graphic Method)



ภาพที่ 4.36 การคำนวณหาความเข้มข้นขาออกของถังปฏิกริยาแบบต่างๆ ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 30 นาที ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ด้วยวิธีกราฟฟิค(Graphic Method)



ภาพที่ 4.37 เปรียบเทียบผลการทำนายนายประสิทธิภาพการบำบัดกับผลการทดลองการบำบัดจาก
กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า



ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบผลการทำนายนายประสิทธิภาพการบำบัดกับผลการทดลองการบำบัดจาก
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

จากภาพที่ 4.37 และ 4.38 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดจากการ
ทำนายนายและที่ได้จากการทดลองจริง ทั้ง 2 กระบวนการ ในการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัด
สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.17 โดยจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจริงกับประสิทธิภาพ

ในการทำนายนี้อาจมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันทุกอัตราการไหล ประสิทธิภาพในการบำบัดจริงจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากอาจจะมีบางบริเวณภายในถังปฏิกริยาที่มีการผสมกันของของเหลวอย่างไม่ทั่วถึง ซึ่งอาจจะทำให้เกิด Dead Zone หรือจุดอับ ตกค้างอยู่ภายในถังปฏิกริยา ทำให้สูญเสียปริมาตรของถังไปในบางส่วนและเกิดปฏิกริยาได้ไม่สมบูรณ์ตามที่ออกแบบไว้ เป็นผลให้ค่าความเข้มข้นภายในถังปฏิกริยาไม่เท่ากันส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดคลาดเคลื่อนจากการทำนาย

$$\% \text{ Remove} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (4.17)$$

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้วิธีการฟิสิกในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียขาออก ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจริง อาจเนื่องมาจากการเกิดการไหลที่ไม่เป็นแบบอุดมคติ ซึ่งมีปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณา ดังนี้ คือ อุณหภูมิ แรงลม ระบบการกวนผสม ระบบกระจายน้ำขาเข้าและขาออกของถังปฏิกริยา และสมบัติการถ่ายเทของสาร ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้สามารถทำให้เกิดจุดอับ Dead Zone ผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาลดลง และคลาดเคลื่อนไปจากวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ โดยจากการศึกษาพบว่าสามารถนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบให้เหมาะสม

การออกแบบระบบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

จากผลการศึกษาพบว่า ในการออกแบบและเดินระบบบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (EC) และกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (EF) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร ตัวแปรสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบทั้ง 2 คือ ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำเสียที่เข้าระบบและตัวแปรที่ขึ้นกับพื้นที่ในการทำปฏิกริยาของขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ ระยะเวลาในการกักเก็บ อัตราการไหลของน้ำเสีย และปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินระบบ ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ค่าอัตราส่วนระหว่างเฟอร์รัสอิออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดอีกตัวแปรเช่นกัน โดยค่าพื้นที่ในการทำปฏิกริยาของขั้วอิเล็กโทรดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำเสีย ในเชิงของพื้นที่

ผิวสัมผัสจำเพาะ คือ (Surface area / Volume of wastewater, A / V) จากการศึกษพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด คือ 8.4 เมตร⁻¹ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเดินระบบและประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.7 ตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร

ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
Surface area / Volume of wastewater (A / V)	8.4 เมตร ⁻¹
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Ampere/ Surface area)	กระบวนการ EC 35.4 -59.5 แอมแปร์/ตร.ม.
ระยะเวลาในการกักเก็บ	30 – 45 นาที

4.8 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการแตกต่างกัน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการต่างๆ น้ำมันตัดเป็นน้ำมันที่มีเสถียรภาพความคงตัวสูงและมีค่าความเข้มข้นสูง ก่อให้เกิดเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในแต่ละกระบวนการ แสดงดังตาราง 4.6 น้ำมันตัดที่นำมาบำบัดมีค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยนำมาบำบัดในกระบวนการจาร์เทสต์และกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า แต่เนื่องจากน้ำเสียมีค่าความเข้มข้นสูงจึงทำให้น้ำเสียที่บำบัดไม่ผ่านตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงนำมาบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน กระบวนการอ็อกซิไดซ์เฟนตันหรือกระบวนการโฟโตอ็อกซิไดซ์เฟนตัน และเพื่อสามารถนำไปใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจริง จึงทำการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอ็อกซิไดซ์เฟนตันโดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการแตกต่างกัน

กระบวนการ	ค่าความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (%)
กระบวนการ Coagulation-Flocculation	1	40	95.55
กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า	1	36.66	96.12
กระบวนการเฟนตัน	0.1	179	87
กระบวนการอ็อกซิไดซ์เฟนตัน	0.1	169.04	92
กระบวนการโฟโตอ็อกซิไดซ์เฟนตัน	0.1	169.52	95
ประยุกต์กระบวนการร่วมกัน โดยเดินระบบต่อเนื่อง	1	277.93	99

จากตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการต่างๆ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างกระบวนการ Coagulation-Flocculation และกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ในกระบวนการ Coagulation-Flocculation และ กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า พบว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำกว่า คือ 36.66 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร.แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าไม่ผ่านตามมาตรฐาน เราจึงนำกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันมาประยุกต์ โดยทำการบำบัดที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.1 กรัมต่อลิตร ซึ่งกระบวนการอ็อกซิไดซ์เฟนตัน เป็นกระบวนการที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงและเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบน้อยกว่ากระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันอื่นๆ คือ 169.04 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจึงนำกระบวนการทั้ง 2 มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดเพื่อเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสีย 33 มิลลิเมตรต่อวินาที เดินระบบระยะเวลา 90 นาที และในกระบวนการอ็อกซิไดซ์เฟนตันเดิม

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร ในการดำเนินระบบต้องเสียค่าใช้จ่ายรวมในการบำบัด คือ 277.93 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจะอาศัยหลักการการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยกลไก Coagulation-Flocculation เพื่อแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสของน้ำ และเกิดเป็นฟล็อกตะกอน แต่เนื่องจากน้ำเสียน้ำมันตัดมีค่าความเข้มข้นสูง ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าไม่ผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด จึงได้มีการนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมาประยุกต์ใช้ร่วมในกระบวนการบำบัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย กระบวนการเฟนตัน กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน และกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งอาศัยหลักการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมันด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัลที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง เพื่อช่วยในการกำจัดอนุภาคของน้ำมันที่ยังเหลืออยู่ในเฟสน้ำ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการต่างๆ เพื่อออกแบบและควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด โดยทำการศึกษาระบบที่ใช้ 2 กระบวนการร่วมกันที่เดินระบบแบบทีละเท (Batch system) และระบบต่อเนื่อง (Continuous system) โดยจากผลการศึกษาในแต่ละส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ศึกษาค่าพีเอชและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (เพอร์ริคคลอไรด์) ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคของน้ำมันและค่าความขุ่น ที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการ coagulation-Flocculation พบว่าที่ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ 7 และค่าความเข้มข้นของเพอร์ริคคลอไรด์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันเท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น 99.4% และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 95.55% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพอร์ริคคลอไรด์เกินปริมาณที่เหมาะสม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากการอนุภาคของน้ำมันที่มีประจุเป็นลบสามารถเปลี่ยนเป็นประจุบวกได้ (Charge Reversal) มีผลกระทบต่อค่าน้ำสูง ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมีเสถียรภาพได้อีกครั้ง

5.1.2 การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตรโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าในการแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากเฟสน้ำเสียพบว่า ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการออกแบบและควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด คือ

- ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม เท่ากับ 1 เซนติเมตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดที่ 90% โดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 - 60 นาที เนื่องจากที่ระยะห่างขั้วน้อยๆ จะส่งผลให้เกิดฟองก๊าซจำนวนมาก จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศสูง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น

- ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วง 35.4 - 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 - 60 นาที แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังคงไม่ผ่านตามมาตรฐาน เพราะน้ำเสียน้ำมันตัดมีค่าความเข้มข้นสูง

- ค่าพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่เหลืออยู่ในเฟสน้ำ ส่งผลให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำจะลดลงตามเวลา

- ปริมาณของเฟอร์ริคไอออน จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณเฟอร์ริคที่ผลิตจากขั้วแอโนดมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณเฟอร์ริคที่ได้จากการทดลองจะมีปริมาณน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากปริมาณเฟอร์ริคที่หาได้จากการทดลองถูกนำไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันและไฮดรอกไซด์ จึงทำให้ปริมาณเฟอร์ริคไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำมีปริมาณน้อยกว่าทฤษฎี โดยตะกอนที่เกิดขึ้นจะเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$

- อันดับการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นอันดับที่ 1 และมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วแตกต่างกัน ในขณะที่ ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วที่ใช้ในการออกแบบและเดินระบบ

5.1.3 การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ EC โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90 % ซึ่งทำให้น้ำมันตัดมีค่าความเข้มข้น (≈ 0.1 กรัมต่อลิตร) ด้วยกระบวนการเฟนตันที่ควบคุมพีเอชน้ำเสียที่ 3 - 4 พบว่า อัตราส่วนเฟอร์ริคซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 1:5 และ 1:10 โดยมวล ซึ่งให้ประสิทธิภาพ

ในการบำบัดซีโอดีและค่าความขุ่นมากกว่า 80 % และมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 - 45 นาที โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด

5.1.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.1 กรัมต่อลิตร พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดที่ 92% และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐานกำหนด โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบและการควบคุมประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนี้

- ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสมเท่ากับ 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 1 เซนติเมตร. โดยควรเลือกใช้ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5 กรัมต่อลิตรและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 - 60 นาที

- ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำจะมีปริมาณสูงกว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เนื่องจากการปรับสภาพพีเอชของน้ำเสียภายในกระบวนการบำบัด

- อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนโดยมวลที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1:5 – 1:10 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับการทดลองเฟนตัน

- ปริมาณเฟอร์รัสไอออนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยมีปริมาณที่เกิดขึ้นสูงกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า เนื่องจากน้ำเสียมีสถานะเป็นกรดส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น โดยที่อันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับค่าอัตราส่วนของเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ที่ที่เหมาะสม

5.1.5 การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้นน้ำมัน 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งอาศัยแสงยูวีในการเปลี่ยนรูปเฟอร์ริกเป็นเฟอร์รัสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุดที่ 95% โดยมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 - 60 นาที ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

5.1.6 การบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องด้วยการออกแบบและเดินระบบกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่สภาวะการทำงานที่เหมาะสมจากการ

ทดลองแบบที่ละเท้างัดนพบว่ ที่อัตราการไหลของเฟสน้ำเสียต่างๆ (16 33 และ 66 มิลลิลิตรต่อ นาที) พบว่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตาม มาตรฐาน โดยการประยุกต์ใช้สมการการออกแบบถึงปฏิริยาสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพการ บำบัดของแต่ละกระบวนการอย่างง่ายได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการนำกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน ไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

1. ศึกษาขั้วอิเล็กโตรดชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการการบำบัดได้ เช่น ไทเทเนียม
2. ทำการปรับเปลี่ยนการป้อนสารเคมีในกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันให้เป็นระบบต่อเนื่อง หรือแบบ Step-feed system
3. ทำการศึกษาการออกแบบระบบให้สามารถรับน้ำเสียในปริมาณมากได้ เพื่อนำไป ประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดจริง
4. ใช้บำบัดกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เกิดขึ้นจริงหรือน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันปาล์ม เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- จันทนภาและจิตติมา. 2546. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยวิธี Photo-Fenton
oxidation Process.โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนากร เมธาธรรม. 2554. การกำจัดสาร 2,4 ไดคลอโรฟีนอลและไตรโคลซาลด้วยกระบวนการ
เฟนตันและอิเล็กโตรเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ. 2552. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
และไซโนเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
(สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทบวงมหาวิทยาลัย. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมี ตามโครงการ
ปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัย. เคมี. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 2.
กรุงเทพมหานคร : อักษรเจริญทัศน์, 2528.
- ปริเมธ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- ปาริฉัตร มาลีวงษ์. 2547. การเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดน้ำของตะกอนส่วนเกินโดยใช้สารเคมี
ของเฟนตันเปรียบเทียบกับแสงอัลตราไวโอเล็ต/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปาริชาติ หมั่นสีทา. 2547. การกำจัดสีและซีไอดีจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการ
บำบัดบางส่วนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันในกระบวนการผลิตน้ำประปา.
[ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา [http://www.mwa.co.th/ewt/mwa_internew/water_](http://www.mwa.co.th/ewt/mwa_internew/water_technology1.html)
technology1.html [13 พฤษภาคม 2554]

- พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล. 2555. เอกสารคำสอน วิชา วิชา หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
2107662. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
มันรัช ตันกุลเวศม์และมันลิน ตันกุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพมหานคร :โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันกุลเวศม์. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 1, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันลิน ตันกุลเวศม์, ไพพรรณ พรประภาและมันรัช ตันกุลเวศม์. การปรับปรุงคุณภาพน้ำ เล่มที่
1, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2552.
- มารุต โปราณานนท์. 2547. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟน
ตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนัก
จากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิฑูรย์ กิตติถาวร. 2553. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 พ.ค. - ส.ค.
สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์. 2552. การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็ก
โทรสตาติกโคอะเลเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิรดี สุนทรภา. 2549. การนำกลับดีบุกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทาง
ไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัญชลี รังสรรค. 2551. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
กรุงเทพมหานคร. 2545.

ออยเซิร์ฟ. การบำรุงรักษาน้ำมันหล่อเย็น [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.oilservethai.com>
(28 กุมภาพันธ์ 2554).

ภาษาอังกฤษ

American Water Works Association. 2005. 21th ed. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Anotai, J., Su, C.C., Tsai, Y.C and Lu, M.C. 2010. Effect of hydrogen peroxide on aniline oxidation by electro-Fenton and fluidizes-bed Fenton processes. Journal of Hazardous Materials. 183: 888-893

Aurelle, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok : Chulalongkorn.

Atekwana, El.A., Atekwana, Es.A., Rowe, R.S., Werkema, D.D and Legall, W. 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. Journal of Applied Geophysics. 56: 281–294

Ayhan, I., and Mahmut, O. 2006. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. Journal of Hazardous Materials B137: 1197–1205.

Bejankiwar, R.S. 2002. Electrochemical treatment of cigarette industry wastewater: feasibility study. Water Research 36: 4386–4390.

Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F., and Nezzal, G. 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsion using aluminium plate electrode. Journal of Hazardous Materials 152: 423-430.

Chen, X., Chen, G., and Yue, P.L. 1999. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Separation and Purification Technology 19: 65-76.

Dai, Y., Qi, Y., Zhao, D., and Zhang, H. 2008. An oxidative desulfurization method us ultrasound/Fenton's reagent for obtaining low and/or ultra-low sulfur diesel fuel. Fuel Processing Technology 89: 927-932.

Eyup, Atmaca. 2009. Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method. Journal of Hazardous Materials 163: 109-114.

Friedrich H. 1962. Ion Exchange New York : MaGraw-Hill.

- Glaze, W.H., Hang, J.W., and Chapin, D.P. 1997. The Chemistry of Water Treatment Process Involving Ozone, Hydrogen peroxide and Ultraviolet Radiation. Ozone Sci. Eng.: 9-335.
- Ichikawa, T., Itoh, K., Yamamoto, S., and Sumita, M. 2004. Rapid demulsification of dense oil-in-water emulsion by low external electric field I. Experiment evidence. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 242: 21-26.
- Tezcan, U.U., Ugur, S., Koparal, A.S., and Ogotveren, U.B. 2006. Electrocoagulation of olive mill wastewater. Separation and Purification Technology 52: 136-141.
- Inan, H., Anatoly, Dimoglo., Simsek, H., and Karpuzeu, M. 2004. Olive oil mill wastewater treatment by means of electro – coagulation. Separation and Purification Technology 36: 23-31.
- Jiang, C. C., and Zhang, J. F. 2007. Progress and prospect in electro-Fenton process for wastewater treatment. Journal of Zhejiang University of Science A 8: 1118-1125.
- Kobyas, M., Taner, O.C., and Bayramoglu, M. 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrode. Journal of Hazardous Materials 100: 163-178.
- Larue, O., and Vorobiev, E. 2003. Floc Size Estimation in Iron Induced Electrocoagulation and Coagulation using Sedimentation Data. Int. J. Miner. Proc. 71: 1-15.
- Lower, S. Electrochemistry [Online]. 2012. <http://www.chem1.com/acad/webtext/elchem/ec4.html>
- Metcalf & Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4thed. Singapore: McGraw-Hill.
- Mohammad, Y.A.M., Paul, M., Jewel, A.G.G., Mehmet, K., Jose, P., and David, L.C. 2004. Present and future perspectives of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials : 199-210.
- Philippopoulos, C.J. ,and Pouloupoulos, S.G. 2003. Photo-assisted oxidation of an oily wastewater using hydrogen peroxide. Journal of Hazardous Materials 98: 201-210.

- Rodriguez , M. 2003. Fenton and UV-vis Baswd Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment :Degradation,Mineralization and Biodegradability Enhancement.University de Barcelona, Barcelona.
- Rosen, M.J. 1989. Surfactants and Interfacial Phenomena 2nd ed. New York : John Wiley&Son.
- Water Quality Division Aquifer Protection Program. 1996. BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft Arizona: Arizona Department of Environmental Quality.
- Sheng, H.L., and Ming, L.C. 1997. Purification of textile wastewater effluent by combined Fenton process and ion exchange. Desilation 109: 121-130.
- Sheng, H.L and Chih, C.C. 2000. Treatment of landfill leachate by combined electro-Fenton oxidation and sequencing batch reactor method. Chemical Engineering, Yuan Ze University, Taiwan.
- Shyh, F.K., Liao, C.H., and Shei, T.P. 2000. Decolorization of textile wastewater by photo-fenton oxidation technology. Chemosphere 41: 1287-1294.
- Xinhua, X., and Xiangfeng, Z. 2004. Treatment of refractory oily wastewater by electro – coagulation process. Chemosphere 56: 889-894.
- Zhang, H., Zhang, D., and Zhou, j. 2006. Removal of COD from landfill leachate by electro-fenton method. Journal of Hazardous Materials 135: 106-111.
- Zhou, H., and Smith, D. W. 2002. Advanced technologies in water and wastewater treatment. Journal of Environmental Engineering 1: 247-254.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

ภาคผนวก ก-1 การหาปริมาณซีโอดี Chemical Oxygen Demand (COD)

(Close –reflux titrimetric method based on Standard methods, APHA, 1992)

ค่าซีโอดีเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่นำไปใช้ในการสลายสารอินทรีย์ที่มีในตัวอย่างน้ำได้ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีก็เพื่อวัดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม การวิเคราะห์ซีโอดีใช้เวลาสั้นประมาณ 3 ชั่วโมง จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถแก้ไขได้ทันทีที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น และสามารถนำค่าไปประมาณค่าบีโอดีของตัวอย่างได้เมื่อหาอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียชนิดนั้นได้

วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 5 มิลลิลิตร. ลงในหลอดย่อยสลายและเติม $K_2Cr_2O_7$ 0.1N 3 มิลลิลิตร. H_2SO_4 7 มิลลิลิตร. แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1 - 2 หยดและไทเทรตด้วยสารละลาย FAS

วิธีวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี

เตรียมน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 5 มิลลิลิตร. เติม $K_2Cr_2O_7$ 0.1N 3 มิลลิลิตร. H_2SO_4 7 มิลลิลิตร. แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1 - 2 หยดและไทเทรตด้วยสารละลาย 0.1 N FAS จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ทำแบลนด์ทุกครั้งโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างและทำการวิเคราะห์เหมือนน้ำตัวอย่าง

การคำนวณ

การหาความเข้มข้นของสารละลาย FAS = $\frac{\text{ปริมาตรของ } 0.1 \text{ N } K_2Cr_2O_7 \text{ มล.} \times 0.1}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร.)}}$

การหาปริมาณซีโอดี

ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร). = $\frac{(A - B) \times N \times 8.000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร.)}}$

เมื่อ

A = มล. ของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลนด์

B = มล. ของ FAS ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง

N = นอร์มัลลิตี ของ FAS

ภาคผนวก ก-2 การหาปริมาณ Hydrogen peroxide คงค้างด้วยวิธี Standard iodometric Method (Kingzett, 1880: Kolthoff, 1920)

วิธีการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย Sodium Thiosulphate

1. ชั่ง KI 2 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร. เติมน้ำกลั่นจนถึง 100 มิลลิลิตร.
2. เติม 0.025 N $K_2Cr_2O_7$ 10 มิลลิลิตร. และ H_2SO_4 (1+9) 10 มิลลิลิตร.
3. ทิ้งไว้ในที่มืด
4. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึง 200 มิลลิลิตร.
5. ไทเทรตกับ 0.025 N $Na_2S_2O_3$ จนได้สีเหลืองอ่อน หยดน้ำแป้ง 2 มิลลิลิตร. จะเป็นสีน้ำเงิน
6. ไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป

วิธีการหาปริมาณ Hydrogen peroxide

1. นำตัวอย่างน้ำใส่ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร.
2. เติมน้ำกลั่นจนได้ 50 มิลลิลิตร. จากนั้นเติม H_2SO_4 (1:4) และ 1% KI 15 มิลลิลิตร. ตามด้วยแอมโมเนียมโมลิบเดต 2 หยด
3. ไทเทรตกับ 0.025 N Sodium Thiosulfate จนเป็นสีฟางข้าว
4. เติมน้ำแป้ง 2 มิลลิลิตร. และทำไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป
5. ทำการทดลองซ้ำและทำแบลนด์โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง

การคำนวณ

ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย Sodium Thiosulphate

$$\text{ความเข้มข้น } 0.025 \text{ N } Na_2S_2O_3 = \frac{10 \times 0.025}{\text{มิลลิลิตร. ของ } Na_2S_2O_3 \text{ ที่ใช้ไทเทรต}}$$

ปริมาณ Hydrogen peroxide

$$\text{Hydrogen peroxide (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \text{ Na } S_2O_3 \times 17.01 \times 1000}{\text{มิลลิลิตร. } H_2O_2}$$

ภาคผนวก ก-3 การหาปริมาณ เฟอร์รัสไอออน ด้วยวิธีฟีนแอนโทรลีน (Standard methods, APHA,1992)

เหล็กเฟอร์รัสจะทำปฏิกิริยารวมกับ 1,10 ฟีนแอนโทรลีน ที่พีเอชประมาณ 3.2 – 3.3 ด้วยการเติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ เกิดเป็นอิกอนเชิงซ้อน (Complex ion) ที่มีสีส้มแดง ตามสมการ (4.1) ความเข้มข้นของสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์รัสที่ละลายในน้ำ ซึ่งเป็นตามกฎของเบียร์



สารเคมี

1. สารละลายฟีนแอนโทรลีน 1,10-phenanthroline ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 0.1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ซึ่งต้องเติมกรด HCl 2 หยด
2. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ละลาย $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ 250 กรัม ในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร. เติมกรด glacial acetic ลงไป 700 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์รัสไอออน

1. เตรียมตัวอย่างใส่ขวดวัดปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 50 มิลลิลิตร. ทำการเติมกรด HCl เพื่อปรับสภาพพีเอช โดยเติม HCl 2 มิลลิลิตร. ต่อน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร.
2. ทำการเติมสารละลายฟีนแอนโทรลีน 20 มิลลิลิตร และ แอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร. ลงในตัวอย่าง จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร. ตั้งทิ้งไว้ในที่ปราศจากแสง 5 - 10 นาที
3. นำตัวอย่างไปทำการวัดค่าด้วย เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ใช้ น้ำกลั่นแทนแบลนด์
4. ทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมอนุกรมของสารละลายเหล็กให้มีความเข้มข้น 10 20 40 80 และ 100 ไมโครกรัม โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิลิตร. = 10 ไมโครกรัม แล้วทำการเตรียมตามขั้นตอนที่ 1 - 3 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นเหล็กเป็นไมโครกรัมกับค่า Absorbance

การคำนวณ

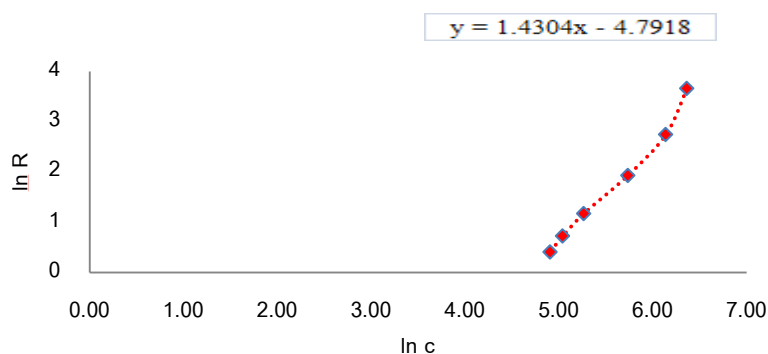
$$\text{เหล็กเฟอร์รัส (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{\text{ไมโครกรัมเหล็กที่อ่านจากกราฟ}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}}$$

ภาคผนวก ก- 4 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยวิธี differential Method

(ธำนิพนธ์ เจริญสินสุวรรณ, 2552)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเทียบกับเวลา $\frac{dC_A}{dt}$ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับ (Rate Equation) อันดับของปฏิกิริยา (Order of Reaction, n) และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (Rate Constant, k) ดังสมการ 4.2 ซึ่งสามารถหาได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln C_A$ และ $\ln r$ ซึ่งสามารถหาได้จากค่า $(\frac{dC_A}{dt})$ ดังภาพที่ 1 จากกราฟจะได้สมการ โดยค่าความชันของสมการจะเท่ากับ ค่าอันดับในการเกิดปฏิกิริยา ส่วนจุดตัดของกราฟ จะเท่ากับ $\ln k$ ซึ่งสามารถหาค่าค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษาค่าอันดับในการเกิดปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงเป็นอันดับที่ 1

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = kC_A^n \quad (4.2)$$



ภาพที่ 1 การศึกษาหาค่าอันดับในการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา

ภาคผนวก ข

บันทึกผลการทดลองกระบวนการ Coagulation - Flocculation

ตารางที่ ข-1 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและค่าความขุ่นโดยกระบวนการ

Coagulation-Flocculation (จาร์เทสต์)

น้ำมันตัดค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาณ เพอร์ริคคลอไรด์ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีเริ่มต้น 3,150 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความขุ่น 1,370 เอ็นทียู

pH	ความขุ่น (เอ็นทียู)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	% การลดลงของ ความขุ่น	% การลดลงของ ซีโอดี
3	1,018	1,509	25.96	52.10
4	932	1,320	32.22	58.10
5	117	320	91.49	89.84
6	52.6	194	96.17	93.84
7	8.6	140	99.37	95.55
8	77.9	297	94.33	90.57
9	290	475	78.91	84.92
10	626	1,256	54.47	60.13
11	650	1,320	52.73	58.10
12	730	1,509	46.91	52.10

ตารางที่ ข-2 ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (FeCl_3) ที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและค่าความขุ่นโดย

กระบวนการ Coagulation-Flocculation (จาร์เทสต์)

น้ำมันตัดค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาณ พีเอชเริ่มต้น 7 ค่าซีโอดีเริ่มต้น 3,150 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความขุ่น 1,370 เอ็นทียู

FeCl_3 (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความขุ่น (เอ็นทียู)	ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	% การลดลงของ ความขุ่น	% การลดลงของ ซีโอดี
40	1,120	2,190	18.55	30.48
60	970	1,215	29.45	61.43
70	12	135	99.12	95.71
80	8.6	140	99.37	95.55
100	540	1,735	60.72	44.92
120	475	1,518	65.45	51.81

ภาคผนวก ค

บันทึกข้อมูลผลการทดลองกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าซีโอดีในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	4,258	3,792	3,315	3,483	0.00	0.00	0.00	0.00
15	3,096	901	604	580	27.29	76.24	81.78	83.35
30	1,470	333	480	464	65.48	91.22	85.52	86.68
45	774	310	264	309	81.82	91.82	92.04	91.13
60	309	248	168	193	92.74	93.46	94.93	94.46
75	270	211	132	154	93.66	94.44	96.02	95.58
90	250	174	130	135	94.13	95.41	96.08	96.12

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าซีโอดีในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	4,602	3,865	3,765	4,042	0.00	0.00	0.00	0.00
15	4,109	2,480	1,276	1,010	10.71	35.83	66.10	75.01
30	1,742	1,061	817	707	62.15	72.54	78.30	82.50
45	1,545	646	434	480	66.43	83.28	88.47	88.12
60	528	392	370	429	88.53	89.85	90.17	89.38
75	425	219	178	202	90.76	94.33	95.27	95.00
90	275	213	154	157	94.02	94.48	95.91	96.11

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าซีโอดีในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	3,272	3,865	3,606	-	0	0	0	-
15	2,369	2,480	1,461	-	27.59	35.82	59.48	-
30	1,600	1,061	472	-	51.11	72.54	86.90	-
45	654	646	248	-	80.00	83.28	93.10	-
60	327	392	217	-	90.01	89.85	93.97	-
75	290	219	198	-	91.14	94.33	94.51	-
90	254	213	155	-	92.21	94.48	95.69	-

- ไม่มีผลการทดลอง

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าความขุ่นในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	1,276	1,271	1,313	1,315	0.00	0.00	0.00	0.00
15	996	636	520	425	21.94	49.96	60.40	67.68
30	184	54.2	40	36	85.58	95.74	96.95	97.26
45	35	19.4	35	15	97.26	98.47	97.33	98.86
60	25	20.8	25	12	98.04	98.36	98.10	99.09
75	20	15.1	12.7	11.7	98.43	98.81	99.03	99.11
90	11.1	11.2	10.1	8.4	99.13	99.12	99.23	99.36

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าความขุ่นในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	1,224	1,295	1,277	1,249	0.00	0.00	0.00	0.00
15	1,182	1,159	615	583	3.43	10.50	51.84	53.32
30	364	267	159	111	70.26	79.38	87.55	91.11
45	90.2	114	45	40	92.63	91.20	96.48	96.80
60	36	32	30	26	97.06	97.53	97.65	97.92
75	26	19.1	12.9	12.5	97.88	98.53	98.99	99.00
90	12.9	19.9	11.5	11	98.95	98.46	99.10	99.12

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าความขุ่นในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	1,285	1,292	1,295	-	0.00	0.00	0.00	-
15	1,197	1,170	1,000	-	6.85	9.44	22.78	-
30	736	574	423	-	42.72	55.57	67.34	-
45	161	143	84	-	87.47	88.93	93.51	-
60	95	43	35	-	92.61	96.67	97.30	-
75	37	32	29	-	97.12	97.52	97.76	-
90	22	28	18.4	-	98.29	97.83	98.58	-

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	8.17	8.15	7.96	7.99
15	9.33	9.56	9.72	9.97
30	10.28	10.27	10.43	10.39
45	10.64	10.34	10.57	10.64
60	10.8	10.72	10.72	10.87
75	10.91	10.89	10.83	10.73
90	10.82	10.92	10.82	10.67

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	24.5	25.5	26.2	22.4
15	24.6	25.8	26.5	27.4
30	25.0	26.0	28.7	29.1
45	25.6	26.2	30.5	31.6
60	25.7	26.6	30.6	33.6
75	25.9	26.9	32.0	35.2
90	26.2	27.0	33.0	37.3

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ตารางเซนติเมตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	275	274	272	274
15	262	263	252	249
30	257	251	242	237
45	255	249	241	236
60	249	241	232	225
75	245	235	225	216
90	243	231	222	213

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	185	187	189	187
15	172	169	167	159
30	167	165	161	153
45	162	160	157	150
60	164	163	160	150
75	161	159	154	152
90	160	156	148	144

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	8.70	8.50	7.02	8.74
15	9.55	9.67	9.45	9.83
30	10.29	10.24	10.34	10.26
45	10.67	10.48	10.35	10.29
60	10.84	10.67	10.71	10.52
75	10.89	10.79	10.89	10.71
90	10.77	10.87	10.86	10.91

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	24.7	24.7	24.7	24.7
15	24.9	24.9	24.9	24.9
30	25.6	25.6	25.6	25.6
45	25.7	25.7	25.7	25.7
60	25.8	25.8	25.8	25.8
75	26.3	26.3	26.3	26.3
90	27.7	27.7	27.7	27.7

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาท)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ตารางเซนติเมตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	320	330	348	320
15	315	304	286	282
30	300	279	257	239
45	280	264	246	228
60	278	264	235	221
75	277	257	235	221
90	270	242	231	213

ตารางที่ ค-14 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาท)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	185	185	185	320
15	178	178	178	282
30	172	172	172	239
45	168	168	168	228
60	165	165	165	221
75	164	164	164	221
90	162	162	162	213

ตารางที่ ค-15 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	8.01	7.86	8.82	-
15	10.51	9.76	9.97	-
30	10.69	10.19	10.72	-
45	10.81	10.4	10.98	-
60	10.91	10.6	11.1	-
75	10.86	10.67	11.25	-
90	10.9	10.6	11.34	-

- ไม่มีผลการทดลอง

ตารางที่ ค-16 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	24.7	24.7	24.7	-
15	24.8	24.8	24.8	-
30	24.9	24.9	24.9	-
45	25.6	25.6	25.6	-
60	25.7	25.7	25.7	-
75	26.3	26.3	26.3	-
90	27.7	27.7	27.7	-

- ไม่มีผลการทดลอง

ตารางที่ ค-17 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ตารางเซนติเมตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	348	341	341	348
15	322	315	304	322
30	293	286	279	293
45	275	275	261	275
60	279	268	250	279
75	268	257	250	268
90	268	250	242	268

ตารางที่ ค-18 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณลักษณะของน้ำเสียในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทาง
ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	187	185	185	187
15	180	178	175	180
30	172	170	168	172
45	167	167	163	167
60	168	165	160	168
75	165	162	160	165
90	165	160	158	165

ตารางที่ ค-19 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณเฟอร์รัสไอออนในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	0.24	0.30	0.34	0.26
15	7	12	16	17
30	16	24	27	29
45	25	32	43	49
60	34	49	58	77
75	42	53	69	90
90	59	65	87	112

ตารางที่ ค-20 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณเฟอร์รัสไอออนในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	0.27	0.26	0.31	0.25
15	10	15	22	31
30	24	35	44	52
45	30	56	60	63
60	42	62	72	89
75	54	68	79	93
90	62	74	82	105

ตารางที่ ค-21 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณเฟอร์รัสไอออนในการ
บำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร

เวลา (นาท)	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 23.8 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 35.4 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 47.6 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	0.28	0.27	0.32	0.25
15	14	18	25	27
30	29	38	42	55
45	36	47	51	60
60	57	65	75	79
75	64	69	84	81
90	58	72	88	97

ภาคผนวก ง
บันทึกข้อมูลผลการทดลองกระบวนการเฟ้นต้น

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อการบำบัดซีไอดีด้วยกระบวนการเฟนตันที่เฟอร์ริสซัลเฟต 500 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)			
	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร (1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร(1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)
0	276.0	230.0	247.0	239.0	0	0	0	0
5	146.3	57.5	42.0	95.6	47	75	83	60
15	110.4	46.0	37.1	47.8	60	80	85	80
30	82.8	46.0	37.1	47.8	70	80	85	80
45	91.1	29.9	32.1	55.0	67	87	87	77
60	96.6	39.1	32.1	59.8	65	83	87	75

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อการบำบัดความขุ่นด้วยกระบวนการเฟนตันที่เฟอร์ริสซัลเฟต 500 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)			
	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร (1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร(1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)
0	165	170	172	168	0	0	0	0
5	132	125	120	114	20.0	27.3	29.4	32.1
15	110	80	75	62	33.3	52.9	55.9	63.1
30	55.8	35	44	46.5	66.2	79.4	74.1	72.3
45	41.3	16.1	27	43.2	75.0	90.5	84.1	74.3
60	39.6	12.8	20	35.7	76.0	92.5	88.2	78.8

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองค่าความเข้มข้น H₂O₂ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการฟenton ที่เฟอร์รัสซัลเฟต 500 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร (1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร(1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)
0	7.30	7.28	7.32	7.03	24.8	23.7	24.3	25.7
5	3.12	3.12	3.07	3.08	24.4	23.8	24.6	24.6
15	3.00	3.02	2.99	2.94	24.8	24.2	24.5	26.3
30	3.16	3.01	3.13	2.97	23.8	25.2	24.7	27
45	3.02	3.07	3.05	2.94	26.3	25.8	25.3	27
60	3.05	3.05	3.09	2.96	27.3	25.9	25.9	28.1

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองค่าความเข้มข้น H₂O₂ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการฟenton ที่เฟอร์รัสซัลเฟต 500 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ตารางเซนติเมตร)				ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร (1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)	H ₂ O ₂ 2.5 กรัม/ลิตร(1:2.5)	H ₂ O ₂ 5 กรัม/ลิตร (1:5)	H ₂ O ₂ 10 กรัม/ลิตร (1:10)	H ₂ O ₂ 25 กรัม/ลิตร (1:25)
0	268	270	265	261	179	181	177	174
5	1,661	1,579	1,557	1,583	1,190	1,130	1,110	1,130
15	1,658	1,540	1,531	1,530	1,180	1,100	1,090	1,080
30	1,648	1,534	1,487	1,524	1,180	1,090	1,050	1,080
45	1,611	1,508	1,455	1,489	1,150	1,070	1,040	1,060
60	1,596	1,476	1,440	1,407	1,140	1,050	1,030	974

ภาคผนวก จ

บันทึกข้อมูลผลการทดลองกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ ๑-1 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H₂O₂ 2.5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ ตารางเมตร.
0	183.46	105.88	135	141.18	175	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	92.28	58.66	78.54	79.34	95.20	49.70	44.60	41.82	43.80	45.60
10	68.25	29.41	47.25	47.06	86.99	62.80	72.22	65.00	66.67	50.29
15	45.87	15.70	19.59	42.35	56.86	75.00	85.17	85.49	70.00	67.51
30	23.85	13.58	22.50	28.24	42.75	87.00	87.17	83.33	80.00	75.57
45	20.18	30.25	16.61	17.65	55.00	89.00	71.43	87.70	87.50	68.57
60	27.52	35.29	34.78	17.65	61.08	85.00	66.67	74.24	87.50	65.10

ตารางที่ ๑-2 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดซีโอไซด์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H₂O₂ 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอไซด์ (มิลลิกรัม/ลิตร)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอไซด์ (%)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ ตารางเมตร.
0	195.00	228.57	195.00	152.10	188.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	91.46	102.63	91.26	64.19	90.52	53.10	55.10	53.20	57.80	52.10
10	60.45	76.18	76.05	53.24	56.32	69.00	66.67	61.00	65.00	70.20
15	51.50	38.10	54.25	33.46	37.80	73.59	83.33	72.18	78.00	80.00
30	33.15	16.32	24.02	22.82	26.46	83.00	92.86	87.68	85.00	86.00
45	58.50	18.10	39.00	19.77	45.36	70.00	92.08	80.00	87.00	76.00
60	62.40	38.10	49.45	41.07	68.03	68.00	83.33	74.64	73.00	64.00

ตารางที่ ๑-3 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H₂O₂ 25 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ ตารางเมตร.
0	210	152.38	219	194.12	156.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	84.00	46.17	86.42	72.02	61.09	60.00	69.70	60.54	62.90	60.90
10	71.40	33.37	73.28	60.51	42.50	66.00	78.10	66.54	68.83	72.80
15	63.00	25.40	61.32	54.16	31.72	70.00	83.33	72.00	72.10	79.70
30	52.50	32.76	54.75	48.53	26.56	75.00	78.50	75.00	75.00	83.00
45	46.20	41.14	43.80	38.82	37.50	78.00	73.00	80.00	80.00	76.00
60	58.80	43.53	48.18	48.53	48.44	72.00	71.43	78.00	75.00	69.00

ตารางที่ ๑-4 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าความขุ่นด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H₂O₂ 2.5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ ตารางเมตร.
0	109	77.9	106	123	115	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	82.1	71.5	71.4	145	85	24.68	42.80	32.64	32.64	26.09
10	75.1	61.7	11.3	57.1	47.1	31.10	50.64	89.34	89.34	59.04
15	72.9	46.2	8.55	53.0	32.5	33.12	63.04	91.93	91.93	71.74
30	62.7	32.2	7.15	48.2	29.1	42.48	74.24	93.25	93.25	74.70
45	54.2	30.5	5.86	43.2	18.5	50.28	75.60	94.47	94.47	83.91
60	78.1	49.4	12.3	29.1	22.9	28.35	60.48	88.40	88.40	80.09

ตารางที่ ๑-5 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าความขุ่นด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H₂O₂ 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ ตารางเมตร.
0	112	128	139	103	135	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	92.1	108	129	55.6	28.5	17.77	15.63	14.39	46.02	78.89
10	75.6	71.5	76.9	47.8	9.2	32.50	44.14	44.68	53.59	93.19
15	45.6	15.9	33.1	31.6	7.1	59.29	87.58	76.19	69.32	94.74
30	32.1	13.4	29.5	30.9	3.5	71.34	89.53	78.78	70.00	97.41
45	28.4	13	20.6	24.9	2.3	74.64	89.84	85.18	75.83	98.30
60	20.3	10.5	18.7	12.6	4.7	81.88	91.80	86.55	87.77	96.52

ตารางที่ ๑-6 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดค่าความขุ่นด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H₂O₂ 25 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ ตารางเมตร.
0	130	137	133	132	125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	115	99.5	73.7	113	101	11.54	27.37	44.59	14.39	19.20
10	79.1	63.2	69.2	76.9	67.1	39.15	53.87	47.97	41.74	46.32
15	55.7	32.9	42.4	22.6	30.5	57.15	75.99	68.12	82.88	75.60
30	32.4	13.5	35.7	19.0	22.4	75.08	90.15	73.16	85.61	82.08
45	24.3	11.2	14.0	17.8	15.4	81.31	91.82	89.47	86.52	87.68
60	12.8	9.86	11.7	15.6	24.5	90.15	92.80	91.20	88.18	80.40

ตารางที่ ๑-7 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ
ของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 2.5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	3.00	2.9	2.86	2.87	2.89
5	3.06	3.07	3.04	2.95	3.49
10	3.59	3.15	3.25	3.25	3.61
15	3.72	3.22	3.39	3.36	3.70
30	3.86	3.63	3.59	3.62	3.87
45	3.90	3.67	3.80	3.72	3.93
60	3.97	3.89	3.93	3.89	3.99

ตารางที่ ๑-8 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ
ของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 2.5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	27.1	27.9	27.8	24.7	28.2
5	27.1	27.7	28.5	27.8	28.6
10	27.8	28.3	28.6	25.7	29.1
15	27.9	29.2	29.1	26.6	29.
30	28.5	29.6	30	27.4	31.2
45	30.3	31.8	31.9	29.3	34.8
60	31.8	34.2	33.5	31.1	37.5

ตารางที่ ๑-9 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ
ของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 2.5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ตารางเซนติเมตร)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	1,237	1,215	1,008	1,310	1,259
5	1,078	921	856	1,039	1,124
10	1,048	672	713	977	985
15	1,019	671	651	922	846
30	809	588	623	865	719
45	615	402	601	715	689
60	479	395	539	693	630

ตารางที่ ๑-10 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ
ของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 2.5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร.)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	877.3	861.7	714.9	929.1	892.9
5	764.5	653.2	607.1	736.9	797.2
10	743.3	476.6	505.7	692.9	698.6
15	722.7	475.9	461.7	653.9	600.0
30	573.8	417.0	441.8	613.5	509.9
45	436.2	285.1	426.2	507.1	488.7
60	339.7	280.1	382.3	491.5	446.8

ตารางที่ ๑-11 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	3.06	3.25	3.27	3.15	2.89
5	3.22	3.34	3.46	3.3	3.16
10	3.28	3.49	3.5	3.37	3.49
15	3.49	3.74	3.7	3.62	3.54
30	3.5	3.87	3.84	3.72	3.61
45	3.53	3.92	3.96	3.88	3.82
60	3.59	3.97	3.99	3.94	3.90

ตารางที่ ๑-12 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	28.3	27.7	26.4	27.5	26.9
5	28.4	28.1	26.5	27.6	27.2
10	28.4	28.5	27.8	28.9	27.6
15	29.5	28.9	32.8	31	28.8
30	31.7	29	36.8	33	29.8
45	34.7	32.8	41.4	35.1	37.2
60	37.7	37.7	42.1	42.2	43.1

ตารางที่ ๑-13 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์/ตารางเซนติเมตร)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	1,337	1,304	1,389	1,415	1,405
5	1,310	1,188	1,234	1,347	1,301
10	1,039	856	1,164	1,278	1,287
15	977	713	946	980	1,108
30	865	651	894	945	951
45	715	623	789	897	912
60	693	608	695	765	824

ตารางที่ ๑-14 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	955.0	924.8	992.1	996.5	1003.6
5	935.7	842.6	881.4	948.6	929.3
10	742.1	607.1	802.0	887.0	897.0
15	688.0	505.7	675.7	690.1	771.0
30	617.9	461.7	638.6	665.5	679.3
45	510.7	441.8	563.6	631.7	651.4
60	495.0	431.2	496.4	538.7	588.6

ตารางที่ ๑-15 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 25 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าพีเอช				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	3.1	3.19	2.92	2.99	3.01
5	3.21	3.4	3.27	3.1	3.34
10	3.26	3.52	3.33	3.36	3.55
15	3.37	3.67	3.52	3.54	3.7
30	3.49	3.71	3.7	3.69	3.83
45	3.57	3.84	3.8	3.77	3.91
60	3.79	3.97	3.96	3.84	3.99

ตารางที่ ๑-16 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 25 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	25.3	28.2	27.7	27.5	28.0
5	25.8	28.3	28.1	27.6	28.2
10	26	28.9	28.9	28.9	28.8
15	26.5	30.7	28.5	31	29.8
30	27.1	30.9	29	33	36.2
45	28.3	34.8	32.8	42.4	42.8
60	29.3	38.6	37.7	46.5	46.6

ตารางที่ ๑-17 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 25 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์/ตารางเซนติเมตร)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	1,578	1,597	1,602	1,621	1,599
5	1,401	1,385	1,494	1,512	1,421
10	1,349	1,302	1,358	1,457	1,378
15	1,289	1,211	1,245	1,347	1,314
30	1,147	1,034	1,198	1,298	1,298
45	911	876	925	1,145	1,013
60	845	712	874	912	934

ตารางที่ ๑-18 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 25 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	1,127.1	1,132.6	1,128.2	1,149.6	1,142.1
5	1,000.7	982.3	1,052.1	1,072.3	1,015.0
10	963.6	923.4	956.3	1,033.3	984.3
15	920.7	858.9	876.8	955.3	938.6
30	819.3	733.3	843.7	920.6	927.1
45	650.7	621.3	651.4	812.1	723.6
60	603.6	505.0	615.5	646.8	667.1

ตารางที่ ๑-19 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) (มิลลิกรัม/นาที)				
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 95.33 แอมแปร์/ ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	0	0	0	0	0
5	25	32	35	39	42
10	34	55	59	64	67
15	78	89	94	95	115
30	92	120	145	164	196
45	125	199	226	254	360
60	150	221	279	365	425

ภาคผนวก ฉ

บันทึกข้อมูลผลการทดลองกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีด้วย
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)			ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)		
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	195	225.56	211	0.00	0.00	0.00
5	129	119.1	95.2	33.85	47.20	54.88
10	77.90	61.35	62.32	60.05	72.80	70.62
15	52.78	29.32	42.45	72.93	87.00	80.09
30	47.10	13.53	32.67	75.85	94.00	84.83
45	32.54	11.28	29.12	83.31	95.00	86.26
60	42.10	29.32	26.26	78.41	87.00	87.68

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดความขุ่นด้วย
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (เอ็นทียู)			ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (%)		
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 83.33 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	195	225.56	211	0.00	0.00	0.00
5	129	119.1	95.2	33.85	47.20	54.88
10	77.94	61.35	62.10	60.05	72.80	70.62
15	52.78	46.92	42.89	72.93	79.20	80.09
30	47.19	32.10	32.54	75.85	85.77	84.83
45	32.54	25.26	29.12	83.31	88.80	86.26
60	42.17	39.77	26.98	78.41	82.40	87.68

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีด้วย
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ตารางเซนติเมตร)		
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	1,579	1,681	1,624
5	1,402	1,443	1,546
10	1,287	1,304	1,497
15	1,165	1,189	1,349
30	1,078	1,120	1,278
45	935	895	987
60	700	720	875

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีด้วย
กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร.	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร.
0	1,127.86	1,192.20	1,151.77
5	1,001.43	1,023.40	1,096.45
10	919.29	924.82	1,061.70
15	832.14	843.26	956.74
30	770.00	794.33	906.38
45	667.86	634.75	700.00
60	500.00	510.64	620.57

ตารางที่ ๕-5 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรไลซิสที่ค่าความเข้มข้น H_2O_2 5 กรัม/ลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์/ตารางเมตร	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 107.1 แอมแปร์/ตารางเมตร
0	0.29	0.29	0.26
5	32	39	52
10	45	68	167
15	89	108	262
30	111	133	339
45	145	245	405
60	190	280	530

ภาคผนวก ช
บันทึกข้อมูลผลการทดลองการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาท)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)					
	อัตราการไหลน้ำเสีย 66 มิลลิตร/นาท.		อัตราการไหลน้ำเสีย 33 มิลลิตร/นาท.		อัตราการไหลน้ำเสีย 16 มิลลิตร/นาท.	
	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF
0	3,120	378	3,120	280	3,120	189
15	1,300	289	936	165	770	120
30	850	175	624	128	551	85
45	658	132	440	93	431	73
60	524	119	397	77	358	45
75	470	97	355	69	229	39
90	440	88	320	53	192	32

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาท)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์/ตารางเซนติเมตร)					
	อัตราการไหลน้ำเสีย 66 มิลลิตร/นาท.		อัตราการไหลน้ำเสีย 33 มิลลิตร/นาท.		อัตราการไหลน้ำเสีย 16 มิลลิตร/นาท.	
	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF
0	222	563	235	721	214	1,339
15	187.7	556	177.7	658	163.3	781
30	183.5	363	167.8	337	155.8	467
45	181.7	301	164.6	219	148.8	350
60	181.3	265	163.5	191.3	148.1	310
75	180.9	239	159.5	172.5	147.1	298
90	175.3	221	156.3	167	155.8	198.4

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาท)	ค่าของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร.)					
	อัตราการไหลน้ำเสีย 66 มิลลิตร/นาท.		อัตราการไหลน้ำเสีย 33 มิลลิตร/นาท.		อัตราการไหลน้ำเสีย 16 มิลลิตร/นาท.	
	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF	กระบวนการ EC	กระบวนการ EF
0	148	365	120	490	112	941
15	125	342	118	449	108	536
30	122	244	111	226	104	315
45	121	202	109	144	98.5	299
60	120	202	108	127	97.8	234
75	120	177	106	115	97.5	208
90	116	159	104	111	96.9	132

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าไขมันและน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

อัตราการไหล (มิลลิตร/นาท)	ไขมันและน้ำมันขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไขมันและน้ำมันขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
66	215	9	95.81
33	215	5	97.67
16	215	3	98.60

ภาคผนวก ซ
การคำนวณค่าใช้จ่ายในระบบบำบัด

ภาคผนวก ช-1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้วยวิธีการทำลายเสถียรภาพ Coagulation –
Flocculation

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1 ลิตร เติมเฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) 80 มิลลิกรัมต่อ
ลิตรทำการกวนเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

- ราคาสารเคมี	=	0.08 กรัม × 0.50บาทต่อกรัม
	=	0.040 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	40 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวม	=	40 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ซ-2 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยการเดินระบบแบบทีละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตรโดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ เป็นเวลา 45 นาที

$$\begin{aligned}
 - \text{พลังงานที่ใช้} &= \text{VIt}/1000\text{v} \\
 &= (50 \times 0.5 \times (45/60)) / (1000 \times (1/1000)) \\
 &= 11.25 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 - \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7} \\
 &= 11.25 \times 2.8095 \times 1.07 \\
 &= 33.82 \text{ บาท} \\
 - \text{ราคาขี้เหล็ก 5 บาท/กิโลกรัม} \\
 &\quad (\text{น้ำหนักขี้เหล็กหายไป 0.568 กรัมต่อ 1 ลิตร} = 568 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร}) \\
 \text{ค่าขี้เหล็ก} &= 0.568 \times 5 = 2.84 \text{ บาท} \\
 \text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} &= 33.82 + 2.84 \\
 &= 36.66 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

(* หมายเหตุ : อัตราค่าไฟฟ้า 1 ยูนิิต/หน่วย เป็นการคำนวณจากการประกอบกิจการขนาดกลาง คิดอัตราแบบปกติในขนาดแรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ มีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.8095 บาท/หน่วย)

ภาคผนวก ซ-3 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการฟันทันโดยการเดินระบบแบบทีละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) 1.36 กรัมต่อลิตร และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร

(19 มิลลิลิตรต่อลิตร)

-	ราคาสารเคมีเฟอร์รัสซัลเฟต	=	1.36 กรัม x 0.025 บาทต่อกรัม
		=	0.034 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
		=	34 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
-	ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	5 กรัม x 0.029 บาทต่อกรัม
		=	0.145 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
		=	145 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	ดังนั้น ค่าใช้จ่าย	=	34+ 145
		=	179 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ซ-4 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนตันโดยการเดินระบบ
แบบทีละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 20 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.6 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที

- ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ $5 \text{ กรัม} \times 0.029 \text{ บาทต่อกรัม}$
 $= 0.145 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร}$
 $= 145 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร}$
- พลังงานที่ใช้ $= \text{VIt}/1000\text{v}$
 $= (20 \times 0.6 \times (30/60)) / (1000 \times (1/1000))$
 $= 6 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}$
- ค่าไฟฟ้า $= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7}$
 $= 6 \times 2.8095 \times 1.07$
 $= 18.04 \text{ บาท}$
- ราคาขั้วเหล็ก 5 บาท/กิโลกรัม
 (น้ำหนักขั้วหายไป 1.2 กรัมต่อ 1 ลิตร = 1,200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 ค่าขั้วไฟฟ้า $= 1.2 \times 5 = 6 \text{ บาท}$
 ดังนั้น ค่าใช้จ่าย $= 145 + 18.04$
 $= 163.04 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร}$

ภาคผนวก ซ-5 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการโฟโตอิเล็กโทรเฟนตันโดยการเดินระบบแบบทีละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 20 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.6 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที

$$\begin{aligned}
 - \text{ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์} &= 5 \text{ กรัม} \times 0.029 \text{ บาทต่อกรัม} \\
 &= 0.145 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร} \\
 &= 145 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

$$- \text{พลังงานที่ใช้จากหลอดยูวี (50 วัตต์)} = 50 \text{ วัตต์}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์)} \times \text{ค่าไฟยูนิต/หน่วย} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งาน} \times \text{ภาษี 7\%} \\
 &= 0.050 \text{ กิโลวัตต์} \times 2.8095 \text{ บาท/หน่วย} \times 1.50 \text{ ชั่วโมง} \times \text{ภาษี 7\%} = 0.225 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - \text{พลังงานที่ใช้} &= \text{VIt}/1000\text{v} \\
 &= (20 \times 0.6 \times (30/60)) / (1000 \times (1/1000)) \\
 &= 6 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7} \\
 &= 6 \times 2.8095 \times 1.07 \\
 &= 18.04 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - \text{ราคาขั้วเหล็ก 5 บาทต่อกิโลกรัม} \\
 \text{(น้ำหนักขั้วหายไป 1.25 กรัมต่อ 1 ลิตร = 1,250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)}
 \end{aligned}$$

$$\text{ค่าขั้วไฟฟ้า} = 1.25 \times 5 = 6.25 \text{ บาท}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} = 145 + 0.225 + 18.04 + 6.25$$

$$= 169.52 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร}$$

**ภาคผนวก ซ-6 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับ
กระบวนการ อิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง**

ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดย peristaltic pump เป็นระยะเวลา 90 นาที ทั้ง 2 กระบวนการ โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ส่วนกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร

พลังงานปั๊มที่ใช้ในกระบวนการ EC	=	0.020 กิโลวัตต์
พลังงานที่ใช้เครื่อง power supply	=	VIt/1000v
	=	(30 x 0.5 x (90/60)) / (1000 x (1/1000))
	=	22.52 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร
- ค่าไฟฟ้า	=	พลังงานที่ใช้ x ค่ายูนิตต่อหน่วย x ภาษีร้อยละ 7
	=	22.52 x 2.8095 x 1.07
	=	67.70 บาท
- ราคาขั้วเหล็ก 5 บาทต่อกิโลกรัม		
		(น้ำหนักขั้วหายไป 0.892 กรัมต่อ 1 ลิตร = 892 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ค่าขั้วไฟฟ้า	=	0.892 x 5 = 4.46 บาท
ดังนั้น ค่าใช้จ่าย	=	67.70 + 4.46
	=	72.16 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

พลังงานปั๊มที่ใช้ในกระบวนการ EF	=	0.020 กิโลวัตต์
พลังงานที่ใช้เครื่อง power supply	=	VIt/1000v
	=	(20 x 0.6 x (90/60)) / (1000 x (1/1000))
	=	18 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่าไฟฟ้า = พลังงานที่ใช้ x ค่ายูนิตต่อหน่วย x ภาษีร้อยละ 7
 - = 18 x 2.8095 x 1.07
 - = 54.17 บาท
 - ราคาขี้เหล็ก 5 บาทต่อกิโลกรัม
 - (น้ำหนักขี้เหล็กหายไป 1.32 กรัมต่อ 1 ลิตร = 1,320 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 - ค่าขี้เหล็กไฟฟ้า = 1.320 x 5 = 6.60 บาท
 - ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 5 กรัม x 0.029 บาทต่อกรัม
 - = 0.145 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
 - = 145 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
 - ดังนั้น ค่าใช้จ่าย = 54.17 + 6.60 + 145
 - = 205.7 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
- ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยประยุกต์ทั้ง 2 กระบวนการ
 กระบวนการ EC เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ 72.16 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
 กระบวนการ EF เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ 205.7 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
 ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวมในการดำเนินระบบ 72.16 + 205.7 = 277.93 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนุสรรา โรจนวีลาวัลย์ เกิดวันที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อ
ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2552